

INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ
AMTLICHE MATERIALPRÜFANSTALT FÜR DAS BAUWESEN
TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG

DIREKTOREN: PROF. DR.-ING. DR. ING. E. h. K. KORDINA · PROF. DR.-ING. F. S. ROSTÁSY

30-0100/001

Parameterstudie für Verbundträger
der Feuerwiderstandsklasse F 90
(Versuche zum Erwärmungsverhalten)

Schlußbericht erstattet von

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. K. Kordina
Dipl.-Ing. F. Herschelmann
Dipl.-Ing. E. Richter

Oktober 1984

B I B L I O T H E K
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig
Beethovenstraße 52
D-3300 Braunschweig

Die Untersuchungen wurden im Auftrag der Studiengesellschaft für Anwendungstechnik von Eisen und Stahl e.V., Düsseldorf, im Rahmen des BMFT Projekts BAU 6004/Studiengesellschaft Nr. P 86 "Brandverhalten von Stahl- und Stahlverbundkonstruktionen", Teilvorhaben 2.5, durchgeführt.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	4
1.1 Problemstellung	6
2. Auswertung vorhandener Erwärmungsversuche	8
2.1 Versuchsbeschreibungen	9
2.2 Versuchsergebnisse (Literaturauswertung)	12
2.3 Zusammenfassung	19
3. Erwärmungsversuche	22
3.1 Versuchsplanung und -vorbereitung	22
3.2 Versuchskörper	22
3.2.1 Baustoffe	23
3.2.2 Temperaturmeßquerschnitte	26
3.2.3 Lagerung und Trocknung	30
3.3 Versuchsaufbau und -durchführung	30
3.3.1 Brandraum und Beheizung	30
3.3.2 Einbau der Versuchskörper	31
3.3.3 Meßprogramm	33
3.3.3.1 Meßprogramm der Brandraumtemperaturen	33
3.3.3.2 Meßprogramm der Temperatur in den Versuchskörpern	34
3.3.4 Sonstige Beobachtungen	34
3.4 Versuchsergebnisse	35
3.4.1 Brandraumtemperatur	35
3.4.2 Feuchtigkeitsgehalt der Versuchskörper	35
3.4.3 Temperatur in den Versuchskörpern	35
3.4.4 Sonstige Beobachtungen	36
3.4.4.1 Versuchskörper E-300	36
3.4.4.2 Versuchskörper A-300	37
3.4.4.3 Versuchskörper M-300	37
3.4.5 Auswertung der Versuchsergebnisse	38
3.4.5.1 Versuchskörper E-300	39
3.4.5.2 Versuchskörper A-300	45
3.4.5.3 Versuchskörper M-300	45
3.4.6 Diskussion der Versuchsergebnisse	46

4. Berechnung der Querschnittserwärmung	51
4.1 Berechnungsverfahren	52
4.2 Wärmephysikalische Materialkennwerte	54
4.3 Vergleich von Rechen- und Meßergebnissen	56
4.4 Zusammenfassung	59
5. Beurteilung der Untersuchungsergebnisse im Hinblick auf eine Anwendung in der Praxis	60
5.1 Ergebnisse der Erwärmungsversuche	60
5.2 Beispiel	65
5.3 Ausblick	66
6. Zusammenfassung	68
7. Literatur	69
Verzeichnis der Anlagen	73

1. Einleitung

In den Richtlinien für Stahlverbundträger /7/ wird die Bemessung und Ausführung von Bauteilen geregelt, die aus Stahlträgern und Betongurten bestehen, die durch Verbindungsmittel schubfest miteinander verbunden sind. Die beiden Werkstoffe Beton und Stahl werden beanspruchungsorientiert eingesetzt: der Beton in der Druckzone und der Stahlträger in der Zugzone.

Der Einsatz von Verbundkonstruktionen für weitgespannte und hochbelastete Decken im Hoch- und Industriebau bietet dem Anwender wirtschaftliche Vorteile. Unter anderem ergibt sich in einfacher Form die Möglichkeit, an die Tragkonstruktion durch Schweißen, Schrauben etc. weitere Geräte oder Einrichtungen anzuhängen. Bei Stahlverbundträgern wird nach /6,7/ der Stahlquerschnitt des Zuggurts durch den rechnerischen Grenztragfähigkeitsnachweis unter Normaltemperatur festgelegt. Für die Erzielung hoher Feuerwiderstandszeiten erweist sich vielfach als ungünstig, daß der Zuggurt dem Feuer unmittelbar ausgesetzt ist. Eine Möglichkeit, das Tragverhalten von Stahlverbundträgern unter Brandbeanspruchung zu verbessern und gleichzeitig bei Normaltemperatur die konstruktiven Vorteile des "nackten" Stahluntergurts zu behalten, besteht darin, die Kammern des Stahlträgerprofils - in der Regel handelsübliche I-Profile - auszubetonieren; bei Bedarf werden zusätzlich Stegverstärkungen angebracht und/oder Betonstahlzulagen in die ausbetonierten Kammern gelegt (Bild 1.1). In der Vergangenheit wurden diese konstruktiven Maßnahmen wiederholt mit Erfolg zur Verlängerung der Feuerwiderstandszeit angewendet. Zur gezielten brandschutztechnischen Bemessung fehlt bisher eine systematische Untersuchung, wie das Erwärmungsverhalten der Stahlverbundträger durch die oben aufgeführten konstruktiven Maßnahmen verändert wird bzw. welches die maßgebenden Einflußparameter sind, um das Tragverhalten von Stahlverbundträgern unter Brandeinwirkung entscheidend zu verbessern.

Im vorliegenden Forschungsvorhaben sollen diese Fragen durch theoretisch-rechnerische Studien sowie durch experimentelle Untersuchungen beantwortet werden. Dafür werden an ausgewählten, praxisbezogenen Stahlverbundträger-Querschnitten Erwärmungsversuche ausgeführt, deren Ergebnisse zur Absicherung der theoretisch-rechnerischen Untersuchungen herangezogen werden.

Abschließend werden für die Praxis Entscheidungs- und Konstruktionshilfen erarbeitet, die eine brandschutztechnisch günstige Bemessung von Stahlverbundträgern ermöglichen.

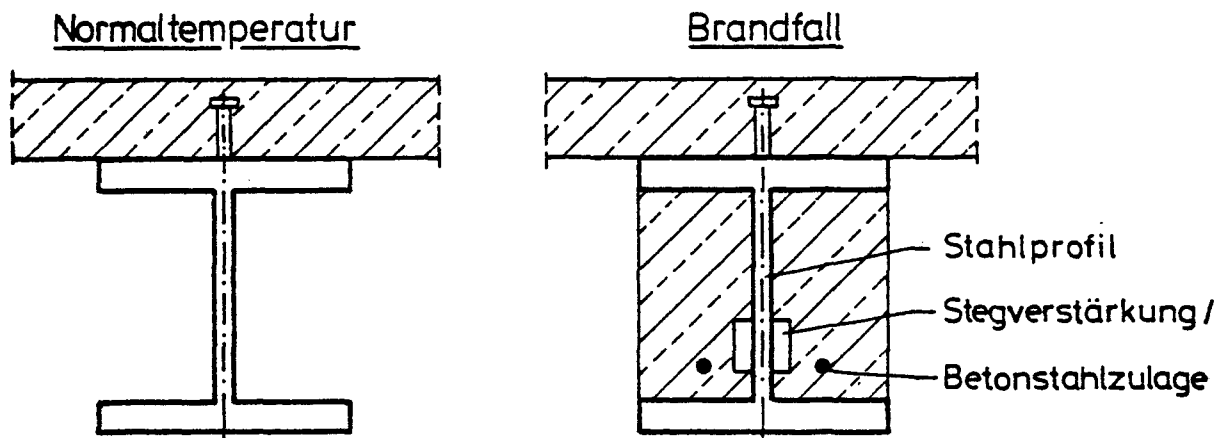


Bild 1.1: Stahlverbundträger

links: für Normaltemperatur

rechts: mit Brandschutzmaßnahmen (ausbetonierte Kammern,
Stegverstärkung oder Betonstahlzulage)

1.1 Problemstellung

Das Erwärmungsverhalten von Stahlbeton- und Spannbetonquerschnitten mit üblichen Bewehrungsgehalten wird durch die Bewehrungseinlagen nur geringfügig beeinflusst /4/. Bei der thermischen Analyse solcher Querschnitte wird deshalb die Bewehrungsstahltemperatur im allgemeinen mit der an entsprechender Stelle gemessenen Betontemperatur gleichgesetzt. Wegen der hohen Temperaturleitfähigkeit des Stahls tritt über den Bewehrungsstabquerschnitt kein Temperaturgradient auf, d.h., die Temperatur im Flächenmittelpunkt ist für den gesamten Bewehrungsstabquerschnitt maßgebend (Bild 1.2).

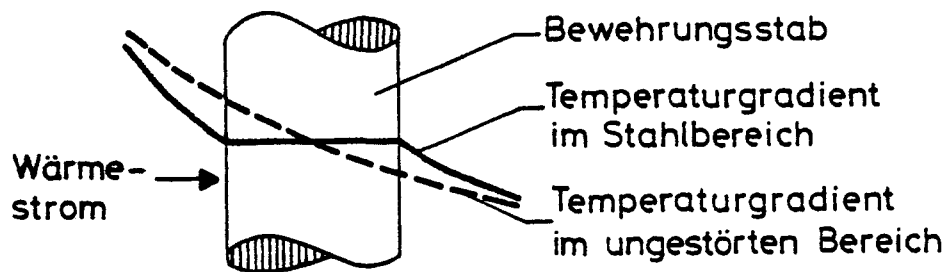


Bild 1.2: Schematischer Temperaturverlauf im Stahlbetonquerschnitt bei instationärer Wärmebeanspruchung

Bei Stahlverbundträgern können die beschriebenen Vereinfachungen in Bezug auf die Temperaturentwicklung des bis auf den Untergurt einbetonierten Stahlträgers nicht übernommen werden.

Die wesentlichen Gründe dafür sind, daß der Untergurt des Stahlträgers unmittelbar zur beflamten Bauteiloberfläche gehört und damit gegenüber dem umgebenden Beton deutlich höhere Wärmemengen in den Querschnitt einleitet, sowie die Tatsache, daß der einbetonierte Stahlträger den Feuchtigkeitstransport des im Beton vorhandenen ungebundenen Wassers (Kapillarwasser) zur unbeflammten Querschnittsoberfläche verhindert, woraus u.U. eine verzögerte Erwärmung von Bereichen resultiert, die im Inneren des Stahlverbundquerschnitts liegen.

Die bei Erwärmung des Stahlverbundträger-Querschnitts eintretende Tragfähigkeitsreduzierung ist die Folge der mit zunehmender Temperatur geringer werdenden Festigkeit der Werkstoffe Beton und Stahl. Sollen Stahlverbundträger einer bestimmten Feuerwiderstandsklasse - z.B. "F 90" - angehören, müssen die Querschnittserwärmung und damit der Tragfähigkeitsabbau so weit verzögert werden, daß das Bauteil während der angestrebten Feuerwiderstandsdauer unter der rechnerisch zulässigen Gebrauchslast nicht zusammenbricht bzw. bei statisch bestimmter Lagerung und überwiegender Biegebeanspruchung die Durchbiebungsgeschwindigkeit den Wert nach DIN 4102 Teil 2, Abschnitt 5.2.6 nicht überschreitet.

Die Feuerwiderstandsklasse von Stahlverbundträgern muß durch Brandprüfungen nach DIN 4102 Teil 2 nachgewiesen werden, da diese Bauteile zur Zeit noch nicht in DIN 4102 Teil 4 aufgenommen sind.

In den Bauordnungen verlangen die Brandschutzforderungen für Kellerdecken im normalen Hochbau in der Regel die Einhaltung der Feuerwiderstandsklasse "F 90". Für Industriebauten gibt es zur Zeit keine durch Erlaß eingeführte Bauverordnung; mögliche Brandschutzforderungen können aber aus den erforderlichen Feuerwiderstandsdauern nach DIN 18 230 /19/ abgeleitet werden. Dabei zeigt sich, daß auch bei Industriebauten der Feuerwiderstandsklasse "F 90" vermutlich eine zentrale Bedeutung zufallen wird.

Wegen der dominierenden Bedeutung der Feuerwiderstandsklasse "F 90" im Hoch- und Industriebau befassen sich die Untersuchungen des vorliegenden Forschungsvorhabens schwerpunktmäßig mit dieser Feuerwiderstandsklasse.

2. Auswertung vorhandener Erwärmungsversuche

Für die Auswertung wurden nur Erwärmungsversuche an Stahlverbundträgern berücksichtigt, bei denen der Brandraum-Temperaturzeitverlauf entsprechend der Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) DIN 4102 Teil 2 /14/ bzw. ISO 834 /15/ verlief. Eine Anzahl in der Literatur erwähnter Erwärmungsversuche wurde wegen fehlender bzw. unzureichender Versuchsbeschreibung nicht für die Auswertung berücksichtigt. Ebenso mußten die Erwärmungsversuche unberücksichtigt bleiben, die im Auftrage von Firmen durchgeführt wurden und für die firmenseitig keine Genehmigung zur Veröffentlichung erteilt wurde.

Neben den Querschnitten von Stahlverbundträgern wurden für die Auswertung des Erwärmungsverhaltens auch ausbetonierte Träger von Stahlprofilblechdecken und Stahlbetondecken mit eingebetteten Stahlträgern berücksichtigt. Für die Beurteilung des Erwärmungsverhaltens ist die Einbeziehung dieser Querschnittsformen gerechtfertigt, da die konstruktiven Abweichungen das Erwärmungsverhalten nur geringfügig beeinflussen bzw. nur solche Temperaturmeßstellen in der Auswertung berücksichtigt wurden, die ausreichend weit von Stellen konstruktiver Besonderheiten entfernt lagen; bei der Analyse des Trag- und Verformungsverhaltens müssen aber die konstruktiven Besonderheiten jedes Querschnitts genau beachtet werden.

Zur geometrischen Beschreibung der unterschiedlichen Querschnittsformen werden die im Bild 2.1 aufgeführten Bezeichnungen benutzt.

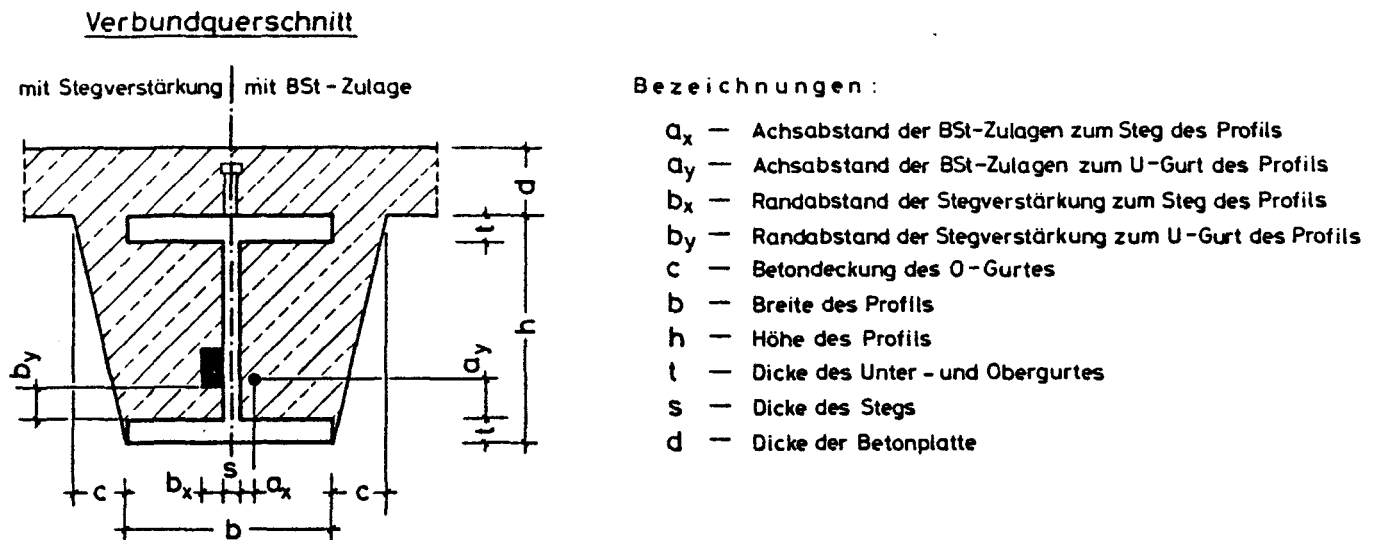

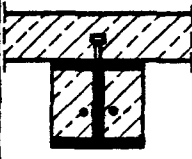
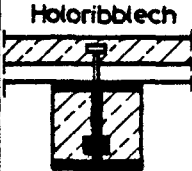




Bild 2.1: Verbundquerschnitt, geometrische Bezeichnungen

2.1 Versuchsbeschreibungen

Im Bild 2.2 sind die unterschiedlichen Querschnittsformen der ausgewerteten Erwärmungsversuche zusammengestellt. Die aus den zugehörigen Versuchsberichten entnommenen Temperaturverläufe am Stahlträger sind in den Anlagen 1 bis 10 dargestellt. Im folgenden werden die unterschiedlichen Querschnittsformen gegenübergestellt sowie die aus den Versuchsberichten entnommenen Angaben über die verwendeten Werkstoffe mitgeteilt. Die ausgewerteten Erwärmungsversuche lassen sich entsprechend der Querschnittsform in fünf Gruppen unterteilen.

Der Verbundquerschnitt 1 entspricht einem Querschnitt eines Stahlverbundträgers mit ausbetonierten Profilkammern. Der Kammerbeton schließt mit dem Untergurt bündig ab und überdeckt den Obergurt an dessen Seitenflächen, d.h. der Kammerbeton ist nach oben hin angevoutet. Im Versuchsbericht /1/ wird das Erwärmungsverhalten eines einbetonierten Stahlträgers IPE 300 beschrieben (Anlage 1). Die seitliche Betondeckung des Obergurtes betrug 45 mm, die Dicke der Betonplatte 100 mm. Angaben über den verwendeten Beton und eine Einmaßung der wenigen Temperaturmeßstellen fehlen.

Verbundquerschnitt			h	b	t	s	c	a_x, b_x	a_y, b_y	Lite- ratur
Nr.	Ausbildung	Profil								
①		IPE 300	300	150	10,7	7,1	~45	-	-	[1]
		IPE 400	400	180	13,5	8,6	60	-	-	[2]
		HE 200B	200	200	15	9	60	32,5	57,5	[2]
②		Geschw Blech- träger	180	180	6	6	0	27	60	[9]
③		Holoribblech								
		IPE 300	300	150	10,7	7,1	0	30	40	[12]
		IPE 400	400	180	13,5	8,6	0	12	40	
		HE 200A	190	200	10	6,5	0	15	40	
		HE 600A	590	300	25	13	0	10	40	
④		Geschw Blech- träger	410	300	24	14	1)	-	-	[20]
⑤		IPE 300	210	150	10,7	7,1	2)	50	50	[21]

1) Seitliche Überdeckung des Obergurtes ist nicht bekannt

2) Obergurt liegt in der Decke

Maße in mm

Bild 2.2: Zusammenstellung der ausgewerteten Erwärmungsversuche
(Maße in mm)

Im Versuchsbericht /2/ wird über das Erwärmungsverhalten eines einbetonierten Stahlträgers IPE 400 (Anlage 2) und eines einbetonierten Stahlträgers HE 200 B (Anlage 3) berichtet. Die seitliche Betondeckung des Obergurtes betrug jeweils 60 mm. Als Beton wurde Beton mit überwiegend quarzhaltigem Zuschlag verwendet.

Der Verbundquerschnitt 2 entspricht dem Querschnitt eines Verbundprofil-Plattenbalkens /9/. Der Beton in den Kammern des aus 6 mm dicken Blechen zusammengeschweißten Trägerprofils schloß bündig mit der Vorderkante von Ober- und Untergurt ab. Die Betongüte des Kammerbetons entsprach einem Beton B 45, die der aufgesetzten Platte einem Beton B 25. Die Zuschläge waren überwiegend quarzhaltig. In jeder Kammer war eine Betonstahlzulage (\varnothing 20 mm) der Festigkeitsklasse BSt 420/500 angeordnet.

Die gemessene Temperaturentwicklung am Stahlträger ist in Anlage 4 dargestellt.

Die Prüfkörper des Verbundquerschnitts 3 bestanden aus einbetonierten Stahlträgern IPE 300, IPE 400, HE 200 A und HE 600 A mit einer über Kopfbolzendübel angeschlossenen, 12 cm dicken Holorib-Decke /12/. Am Steg der Stahlträger waren Zusatzlaschen befestigt.

Die Betongüte (B 25) war für den Beton in den Profilkammern und in der Holorib-Decke gleich.

Neben dem auf ganzer Prüfkörperlänge freiliegenden Untergurt waren durch die Sicken des Holorib-Profilbleches auch Bereiche des Obergurts dem Zutritt heißer Gase ausgesetzt. Wegen dieser teilweise vierseitigen Erwärmung des Stahlträgers wurden vom Verbundquerschnitt 3 nur Temperaturmeßpunkte im unteren Querschnittsbereich für die Auswertung herangezogen. In den Anlagen 5 bis 8 sind die am Stahlträger gemessenen Temperatur-Zeit-Verläufe dargestellt.

Im Versuchsbericht /20/ ist ein Beispiel zum Verbundquerschnitt 4 enthalten. Das Stahlprofil war aus Blechen unterschiedlicher Dicke zusammengeschweißt, zusätzlich war der Untergurt auf der Innenseite durch Bleche verstärkt. Die Unterseite des Untergurts war dem Feuer unmittelbar ausgesetzt, an den Seiten war der Untergurt durch ca. 70 mm Beton überdeckt. Der Kammerbeton war nach oben hin angevoutet.

Die verwendete Betongüte ist in /20/ nicht angegeben.

In Anlage 9 sind die am Stahlträger gemessenen Temperatur-Zeit-Verläufe dargestellt.

Der Verbundquerschnitt 5 stellt eine Stahlbetondecke mit eingebettetem Stahlträger aus /21/ dar. Der Stahlträger IPE 300 ragte nach unten aus der Stahlbetondecke heraus. Dieser herausragende Teil des Stahlträgers war mit Beton B 25 verfüllt; vom Untergurt aus verlief der Beton unter 75° Anvoutung nach oben. Seitlich und unten war der Untergurt ungeschützt. In der Anlage 10 sind die am Stahlträger gemessenen Temperatur-Zeit-Verläufe dargestellt.

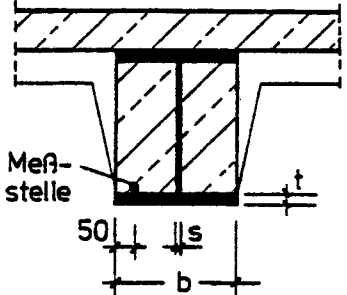
2.2 Versuchsergebnisse (Literaturauswertung)

Zum Vergleich der zeitlichen Temperaturentwicklung am Stahlträger werden Temperaturmeßstellen mit annähernd gleicher Lage in den Verbundquerschnitten ausgewählt. Aus der Gegenüberstellung der Temperaturverläufe werden dann Aufschlüsse erwartet über den Einfluß von Querschnittsform, Querschnittsgröße, Betondeckung, Stahlträgerabmessungen usw. auf die Erwärmung des Stahlträgers.

Im Bild 2.3 werden Temperaturverläufe von Meßstellen auf der Innenseite des Untergurts verglichen. Der seitliche Abstand der Meßstellen zum Untergurtrand betrug 50 mm. Die Temperaturverläufe spiegeln den charakteristischen Verlauf der Brandraumtemperaturkurve wieder: Der steile Anstieg der Brandraumtemperaturen wird zeitversetzt am Stahlträger gemessen. Dabei nimmt die Erwärmung ab mit zunehmender Dicke t des Untergurts und mit größer werdender Profilbreite b , d.h. je größer die Querschnittsfläche des Untergurts ist, desto langsamer steigen die Temperaturen auf der dem Feuer abgekehrten Seite des Untergurts an (vgl. Blechträger, HE 200 A, HE 600 A).

Wegen der hohen Wärmeleitfähigkeit des Stahls bleibt der Einfluß der Untergurtgröße auf das Erreichen eines bestimmten Temperaturwertes aber gering: Aus Bild 2.3 geht hervor, daß bei einer 7-fach größeren Untergurtfläche (vgl. HE 600 A und Blechträger) das Temperaturniveau von z.B. $T = 500^{\circ}\text{C}$ um ca. 5 Minuten später erreicht wird.

Der im Bild 2.3 eingezeichnete Temperaturverlauf des Stahlträgers IPE 300 gehört zum angevouteten Verbundquerschnitt 5.

	Verb.-querschn.	h	b	t
	② Blechträger	180	180	6
	⑤ IPE 300	210	150	10,7
	③ HE-A 200	190	200	10
	③ HE-A 600	590	300	25

Angaben in mm

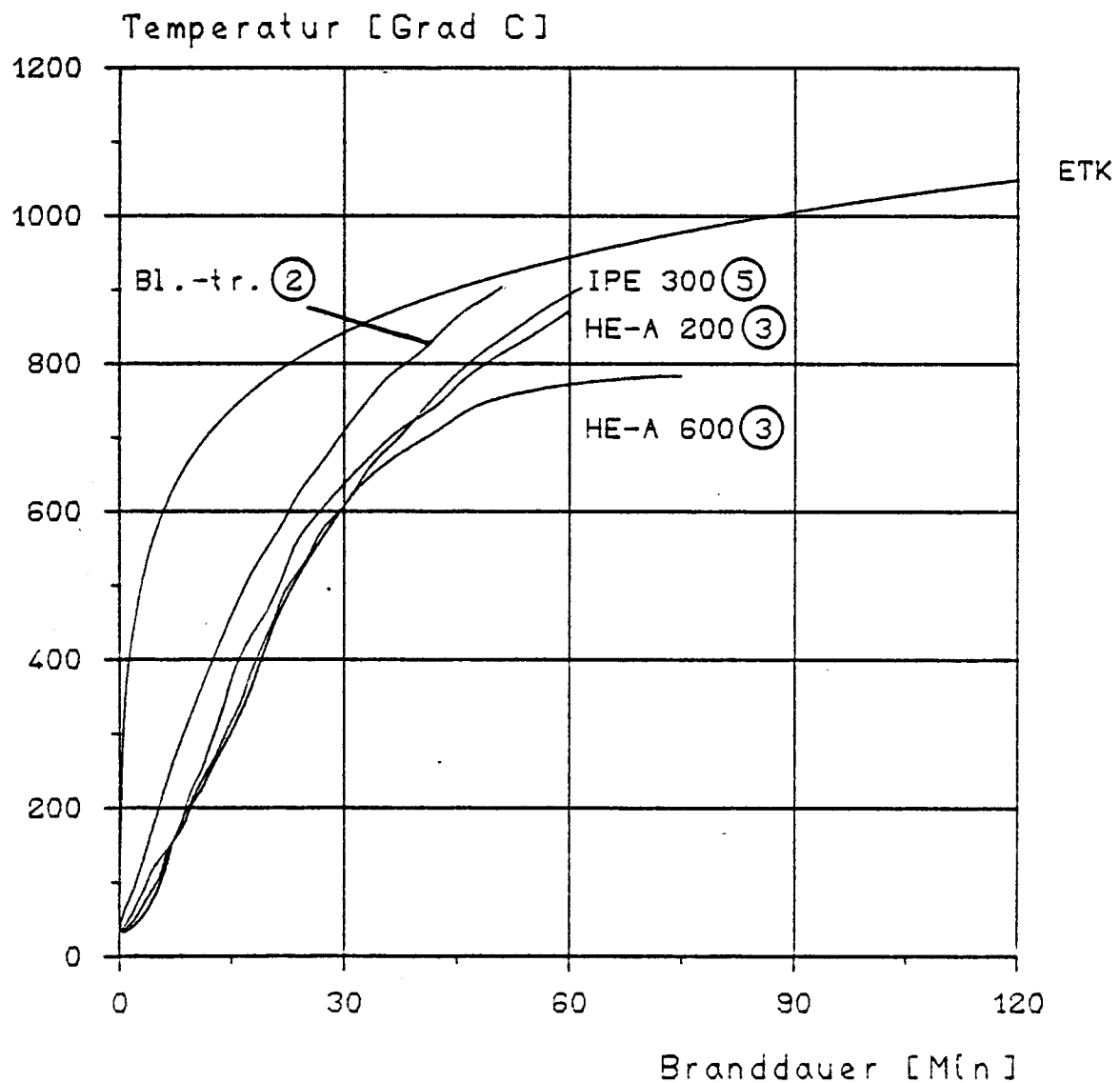


Bild 2.3: Vergleich von Temperatur-Zeit-Verläufen am Untergurt

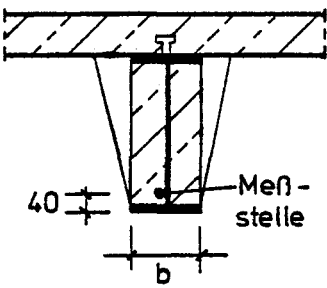
Die enge Übereinstimmung mit den Temperaturverläufen der nicht angewouteten Querschnittsformen zeigt, daß eine Verbreiterung des Kammerbetons zum Obergurt hin nahezu ohne Einfluß auf die Temperaturentwicklung am Untergurt bleibt. Ebenfalls ohne meßbaren Einfluß auf die Erwärmung des Untergurts bleibt die Variation der Trägerhöhe h , die aus dem Deckenbereich herausragt.

Die unterschiedliche Temperaturentwicklung im unteren Stegbereich des Stahlträgers wird im Bild 2.4 verglichen. Die Meßstellen liegen jeweils 40 mm über dem Untergurt. Die Abweichungen zwischen den einzelnen Temperaturverläufen ist gering, d.h. die Erwärmung des unteren Stegbereichs ist nahezu unabhängig von der Trägerhöhe und -breite sowie der Untergurtdicke t und der Stegdicke s . Im Bereich der Streubreite der Meßwerte liegen auch die Abweichungen der Temperaturverläufe beim Vergleich der Querschnittsformen mit und ohne Anwoutung des Kammerbetons.

In den ersten 40 Minuten Branddauer tritt eine Temperatursteigerung von ca. 9 K/min auf, danach verlangsamt sich die Erwärmung auf ca. 5 K/min. Eine Verzögerung der Erwärmung im Bereich von $T = 100^{\circ}\text{C}$, verursacht durch die bei dieser Temperatur zum Verdampfen des im Beton enthaltenen Wassers verbrauchten Energie wird durch die Meßpunkte im unteren Stegbereich nicht registriert. Die Temperaturentwicklung in diesem Bereich der Stahlträger verläuft im wesentlichen unabhängig vom umgebenden Beton.

Je höher die Meßstelle am Steg angeordnet ist, desto deutlicher werden Einflüsse des Betons auf die Temperaturentwicklung am Stahlträger. Im Bild 2.5 sind Temperaturverläufe für Meßstellen gezeigt, die ca. 150 mm über dem Untergurt liegen.

Alle Temperaturverläufe knicken im Temperaturbereich von 100°C deutlich ab. In Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt des Betons, der seitlichen Betondeckung der Meßpunkte sowie der Betonquerschnittsfläche verlaufen die Temperaturen dann zunächst parallel zum 100°C -Niveau und steigen erst nach Verdampfung des Kapillarwassers weiter an.

	Verb.-querschn.	h	b	t	s
	② Blechträger	180	180	6	6
	③ IPE 400	400	180	13,5	8,6
	③ HE-A 600	590	300	25	13
	① HE-B 200	200	200	15	9

Angaben in mm

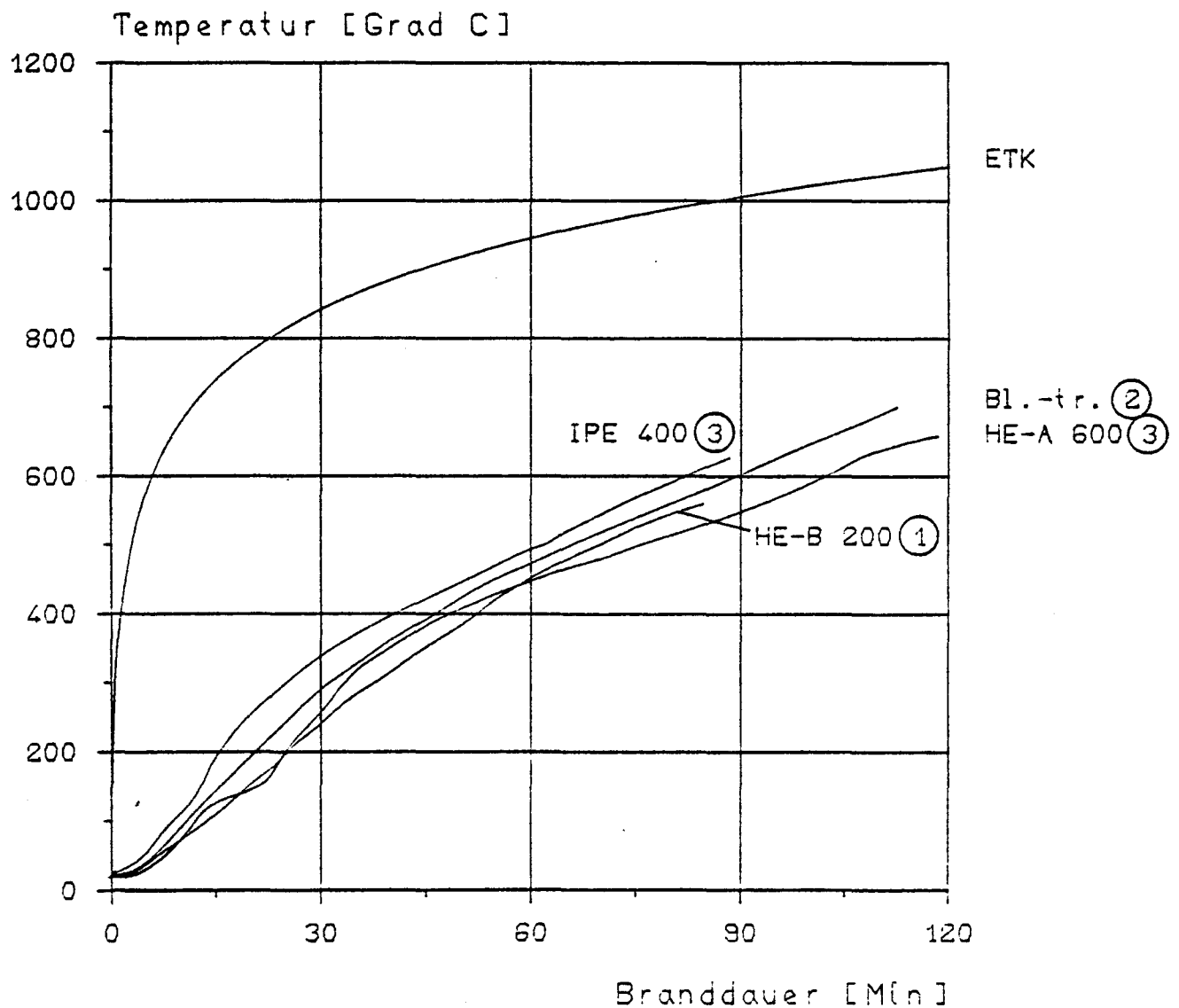
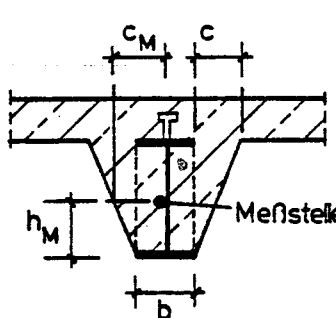


Bild 2.4: Vergleich von Temperatur-Zeit-Verläufen im unteren Stegbereich

	Verb.-querschn.	h	b	h _M	c	c _M
	③ IPE 300	300	150	~140	0	71
	① IPE 300	300	150	~170	~45	93
	③ HE-A 600	590	300	140	0	144
	⑤ IPE 300	210	150	160	1)	115

1) Obergurt liegt in der Decke Angaben in mm

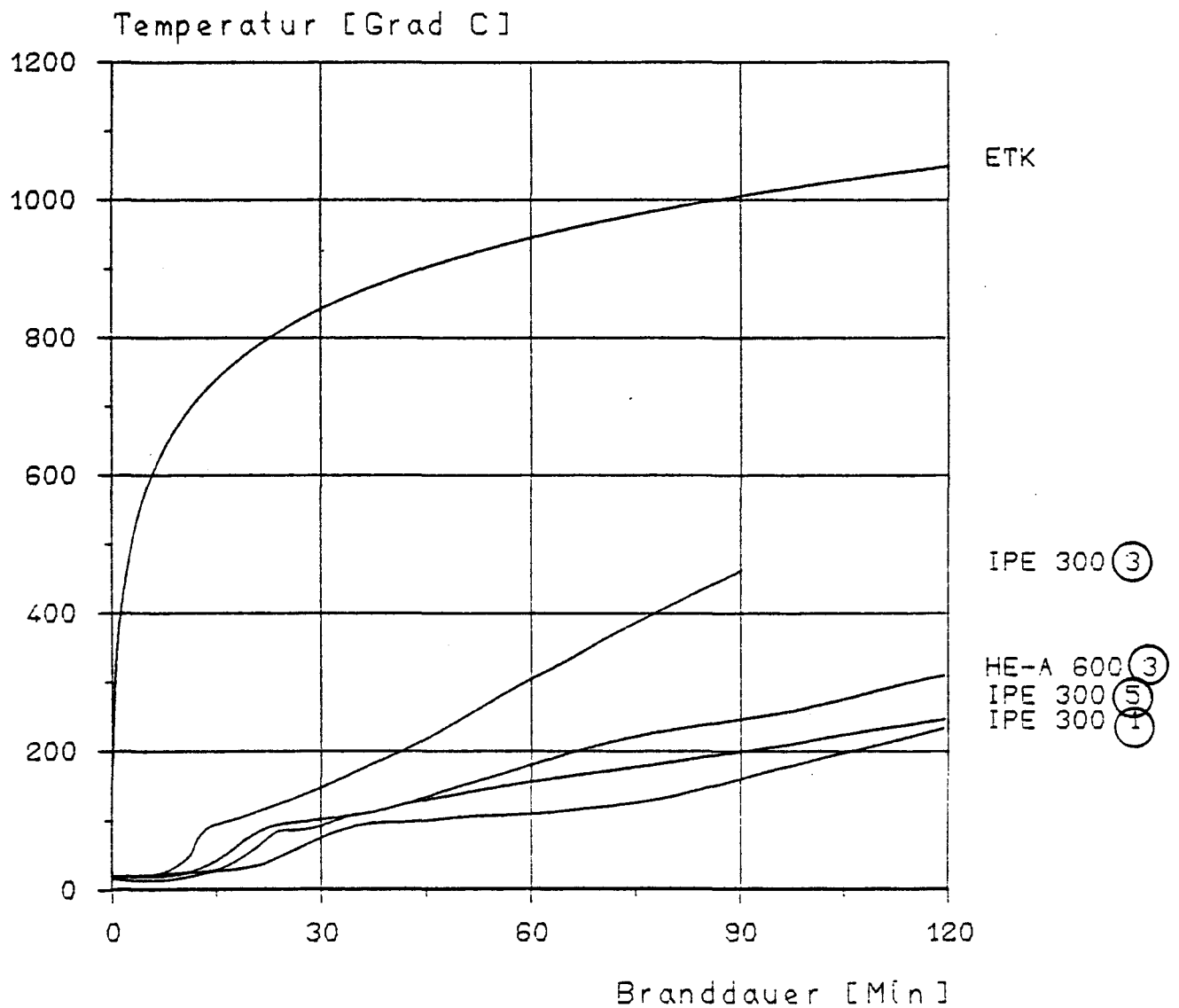
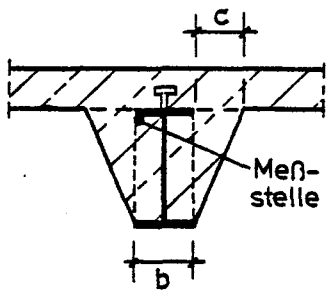


Bild 2.5: Temperatur-Zeit-Verläufe am Steg, ca. 150 mm
vom Untergurt entfernt

Für die betrachtete Meßpunktlage stellen die Abmessungen des Kammerbetons und die seitliche Überdeckung des IPE 300-Trägers des Verbundquerschnitts 3 offensichtlich geometrische Mindestmaße dar, unterhalb der sich kein deutlicher Temperaturhaltepunkt ausbildet. In welchem Maß diese geometrischen Grenzen durch den Feuchtigkeitsgehalt des Kammerbetons verändert werden, kann aufgrund der unzureichenden Angaben in der Literatur über die vorhandene Feuchtigkeit der Prüfkörper nicht angegeben werden.

Beim Vergleich der Temperatur-Zeit-Verläufe von Meßpunkten an der äußeren Kante des Stahlträger-Obergurts wird die Abhängigkeit der Erwärmung dieser Trägerbereiche von der Größe der Betondeckung deutlich. Im Bild 2.6 sind drei Temperaturverläufe von angevouteten Verbundquerschnitten ($c > 0$) und ein Temperaturverlauf eines ohne Voute hergestellten Verbundquerschnitts ($c = 0$) gegenübergestellt. Wegen fehlender Versuchsergebnisse wurde für den nicht angevouteten Verbundquerschnitt ein Meßpunkt herangezogen, der 50 mm von der Außenkante nach innen versetzt angebracht war. Trotz dieser ins Querschnittsinnere verschobenen Lage des Meßpunktes ist kein Einfluß der Betonfeuchtigkeit und der seitlichen Überdeckung auf die Temperaturentwicklung festzustellen, die Temperatur steigt annähernd linear an. Im Gegensatz dazu spiegeln die Temperaturverläufe bei den angevouteten Querschnitten deutlich den Einfluß der Betonfeuchtigkeit und der seitlichen Betondeckung wieder.

Kennzeichnend für die seitliche Betondeckung ist der Temperaturverlauf in den ersten Minuten der Brandbeanspruchung: je größer die seitliche Betondeckung, desto später registriert der Meßpunkt die Temperaturerhöhung, d.h. desto länger verläuft die Temperaturmeßkurve in Höhe der Ausgangstemperatur parallel zur Zeitachse.

	Verb.-querschn.	b	c
	② Blechträger	180	0
	① IPE 300	150	45
	⑤ IPE 300	150	>150
	① IPE 400	180	60

Angaben in mm

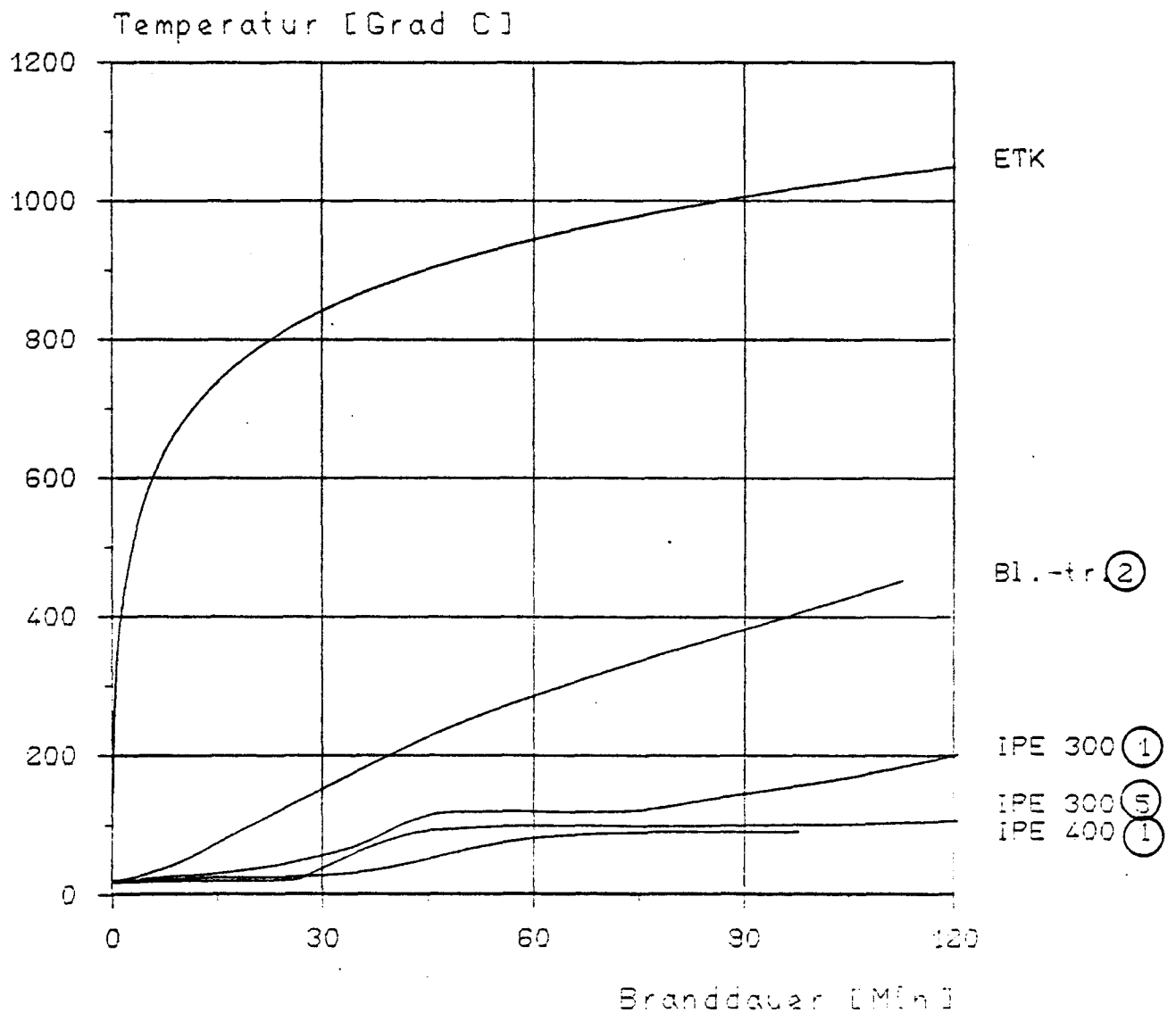


Bild 2.6: Vergleich von Temperatur-Zeit-Verläufen am Obergurt

2.3 Zusammenfassung

In einer Literatursichtung werden Temperaturmessungen an Stahlträgern in Verbundkonstruktionen ausgewertet. Die Stahlträgerabmessungen entsprechen oder sind vergleichbar den genormten Formstahlprofilen nach DIN 1025 /12/ bzw. EURONORM 53-62 /23/. Die Kammern der aus der Decke herausragenden Stahlträger (I-Profile) waren ausbetoniert (z.T. mit Voute). Die Verbundträgerquerschnitte wurden dreiseitig brandbeansprucht (ETK).

Die Auswertung der Erwärmungsversuche läßt sich folgendermaßen zusammenfassen:

1. Die Erwärmung des freiliegenden Untergurts und des unteren Stegbereichs (≤ 40 mm Abstand vom Untergurt) sind nahezu unabhängig von
 - den Untergurtabmessungen b, t
 - der Stegdicke s
 - der Betonfeuchte
 - der Abmessungen des Verbundquerschnitts (z.B. mit oder ohne Voute)
 - der Höhe des aus der Decke herausragenden Trägerteils
2. Der Untergurt erreicht nach 20 Minuten Branddauer Temperaturen von ca. 500°C .
3. Im Stegbereich, 40 mm über dem Untergurt, treten nach 60 Minuten Branddauer Temperaturen von ca. 500°C auf.
4. Bei Untergurtbreiten von $b \geq 150$ mm wirken sich in Stegbereichen, die ≥ 150 mm Abstand vom Untergurt haben, die Betonfeuchtigkeit und die seitliche Betondeckung deutlich im Erwärmungsverhalten durch Auftreten von Temperaturhaltepunkten aus.
5. Stahlzulagen in Form von Stegverstärkungen sollten mindestens im Abstand von 40 mm vom Untergurt angeordnet werden, damit sie im Bereich der Temperaturhaltepunkte liegen.

3. Erwärmungsversuche

Die Zusammenstellung und Auswertung der vorhandenen Brandversuche zeigt, daß die Ergebnisse nur begrenzt für die systematische Klärung des Erwärmungsverhaltens von Stahlverbundträger-Querschnitten brauchbar sind. Infolge der häufig ungenauen Vermaßung der Temperaturmeßpunkte sowie der größtenteils ungenügenden Angaben über die baustoffspezifischen Eigenschaften (Betonfeuchtigkeit, Zuschlagart usw.) fehlen die Voraussetzungen, um streng reproduzierbare Versuchsergebnisse zu erzielen bzw. um eine parameterorientierte Versuchsauswertung vornehmen zu können. Selbstverständlich muß dabei beachtet werden, daß die Mehrzahl der Versuche auch nicht für diesen Zweck durchgeführt wurden.

Die beschriebenen Mängel des vorhandenen Datenmaterials erfordern zusätzliche Erwärmungsversuche an Stahlverbundträger-Querschnitten. Entsprechend der Zielsetzung des Forschungsvorhabens soll schwerpunktmäßig das Erwärmungsverhalten für die Feuerwiderstandsdauer "F 90" untersucht werden. Von besonderem Interesse sind dabei die unteren Querschnittsbereiche, weil sich dort im Brandfall der freiliegende Profiluntergurt sehr schnell erwärmt und damit seine Tragfähigkeit verringert.

In der Regel ist das Tragvermögen des Verbundquerschnitts unter Brandbeanspruchung erschöpft, wenn im Stahlprofiluntergurt die kritische Temperatur erreicht ist. Als kritische Temperatur $\text{crit } T$ wird in DIN 4102 Teil 4 /3/ die Temperatur bezeichnet, bei der die Streckgrenze des Stahls auf die im Bauteil vorhandene Stahlspannung absinkt. Bei einer vorhandenen Stahlspannung in Höhe der zulässigen Spannung nach DIN 1050 /24/ (Lastfall H) beträgt $\text{crit } T$ für Baustahl St 37 und St 52 jeweils 500 °C.

Aus Untersuchungen an Stahlbetonbalkenquerschnitten ist bekannt, daß bestimmte Mindestquerschnittsabmessungen eingehalten werden müssen, damit in der Biegezugzone zur festgesetzten Feuerwiderstandszeit die Temperaturen nicht über die kritische Temperatur ansteigen /4/. Für die Feuerwiderstandsdauer "F 90" schreibt DIN 4102 Teil 4 /3/ als Mindestbreite $b = 150 \text{ mm}$ vor. Dieses Maß wurde den Versuchskörpern für die Erwärmungsversuche als Mindestbreite zugrunde gelegt.

Als Stahlprofil wurde ein IPE 300 gewählt. Neben dieser "Grundausführung" wurde durch Hinzunahme anderer 300-ter Profile (HE 300 A und HE 300 M) die Querschnittsform variiert, wobei vor allen Dingen die Querschnittsbreite und die Untergurtdicke verändert wurden. Die Querschnittshöhe war bei allen Versuchskörpern annähernd gleich. Mit dem Profil HE 300 A wurde ein in der Praxis häufig verwendetes Profil in die Untersuchungen einbezogen, während das Profil HE 300 M insbesondere wegen seiner großen Untergurtdicke ausgewählt wurde.

3.1 Versuchsplanung und -vorbereitung

Für die Untersuchungen wurden drei Versuchskörper mit den Bezeichnungen E-300, A-300 und M-300 hergestellt; der Buchstabe in der Bezeichnung deutet dabei auf das verwendete Stahlprofil hin: IPE 300, HE 300 A und HE 300 M. Das Konstruktionsprinzip war für die drei Versuchskörper gleich: Trägerhöhe und -breite wurden durch das vorhandene Stahlprofil bestimmt, während die Abmessungen der Betonplatte für alle Versuchskörper konstant war.

3.2 Versuchskörper

Die Versuchskörper waren 4,00 m lang. Sie wurden in zwei Bereiche mit unterschiedlicher Querschnittsform aufgeteilt: in dem einen Bereich (Länge 1,70 m) schloß der Kammerbeton bündig mit Ober- und Untergurt des Stahlträgers ab, in dem anderen Bereich (Länge 2,30 m) wurde der Kammerbeton vom Stahlträger-Untergurt nach oben hin angevoutet, so daß der Stahlträger-Obergurt auf jeder Seite 80 mm Betondeckung besaß. Die Untergurte der einbetonierten Stahlträger besaßen seitlich und unten keine Betondeckung. Auf den Stahlträger-Obergurt wurde eine 1,0 m breite und 0,10 m dicke Betonplatte betoniert, in der eine leichte Transportbewehrung verlegt war.

Die Herstellung der Versuchskörper erfolgte in zwei Arbeitsgängen. Zunächst wurde nur der Kammerbeton eingebaut, der bündig mit den Stahlprofilgurten abschloß. Nachdem dieser Beton ausreichend erhärtet war, wurden die Platte und der angevoutete Trägerbereich betoniert.

Der Verbund zwischen dem ausbetonierten Stahlträger und der Betonplatte wurde durch Kopfbolzendübel hergestellt. Im mittleren Bereich der Versuchskörper, jeweils 1,70 m vom Versuchskörperende entfernt, wurde der Steg der Stahlträger auf einer Länge von 60 cm beidseitig durch angeschweißte Zulagen 20 mm x 80 mm verstärkt. Die Zulagen wurden mit Schrittnähten am Steg befestigt. Der Abstand zwischen Untergurt und Zulage betrug 50 mm. Im Bild 3.1 sind die Abmessungen der Versuchskörper zusammengestellt.

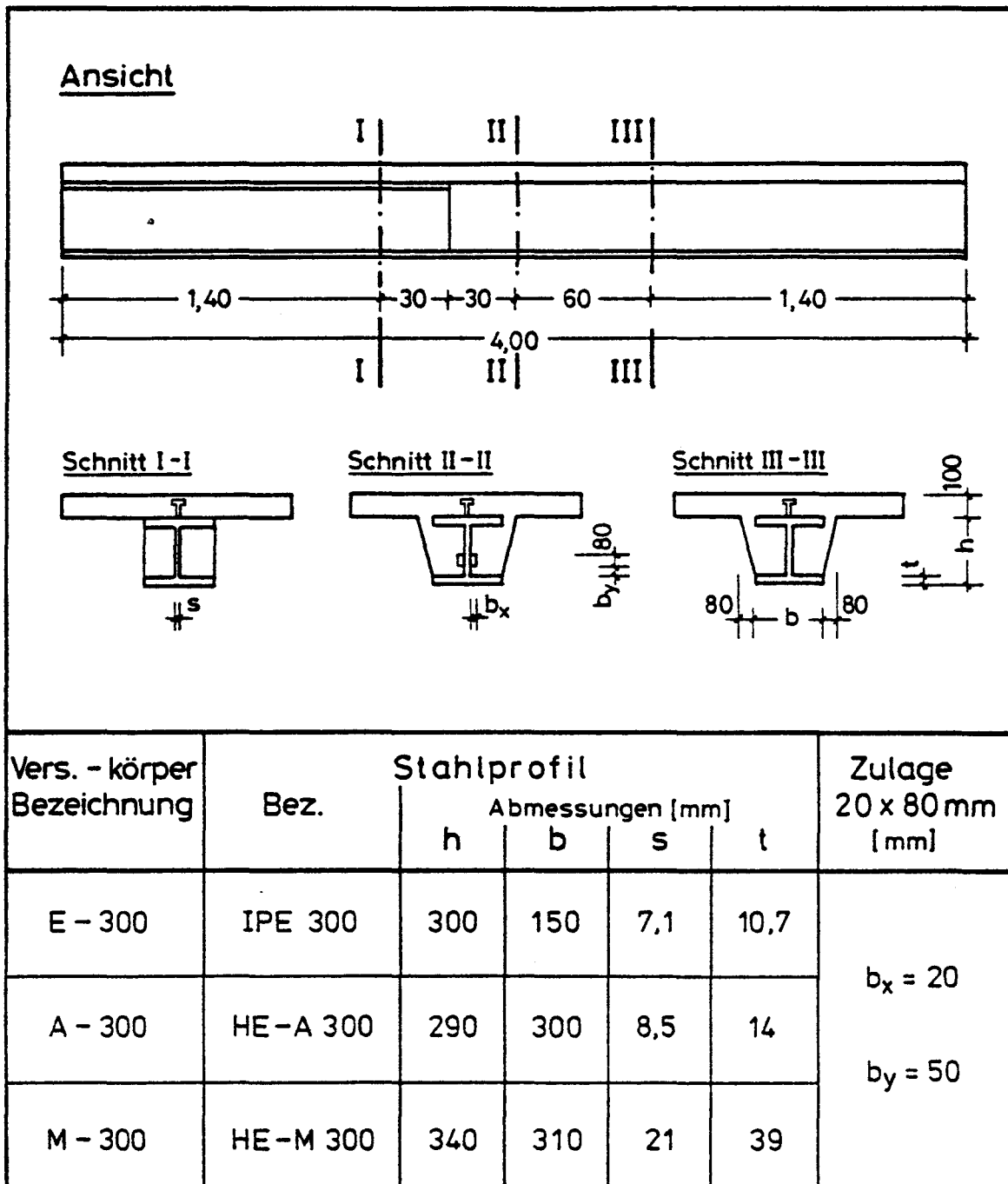


Bild 3.1: Abmessungen der Versuchskörper

3.2.1 Baustoffe

Der Beton wurde werkmäßig in getrennten Betonagen für die Versuchskörper hergestellt. Die Schalung bestand aus Holz, das auf der Innenseite (Versuchskörperseite) mit Betoplan-Tafeln bekleidet war. Als Bindemittel wurde Portlandzement PZ 35 F benutzt.

Die Zuschläge bestanden aus natürlich vorkommenden, überwiegend runden quarzitischen Grubensanden und Kiesen des Braunschweiger Raums und des Harzvorlandes. Die Sieblinie wurde aus drei Fraktionen zusammengesetzt; sie verlief im Bereich 3 zwischen den Sieblinien A und B. Das Größtkorn betrug 16 mm.

Für die Versuchskörper wurde die Betonfestigkeitsklasse B 25 angestrebt. Die Zusammensetzung des Frischbetons ist Tabelle 3.1 zu entnehmen.

Tabelle 3.1: Eigenschaften des Frischbetons

Zuschlag	mm	0/2	2/8	8/16
	kg/m ³	710	358	718
Zement PZ 35 F	kg/m ³	270		
Wasser	l/m ³	189		
W/Z-Wert	-	0,7		
Ausbreitmaß	cm	42		
Konsistenzbereich	-	K 2		

Zur Ermittlung der Betonfestigkeitsdaten wurden gleichzeitig mit den Versuchskörpern jeweils 6 Würfel mit der Kantenlänge 15 cm hergestellt. Davon wurden 3 Würfel nach DIN 1048 gelagert und im Alter von 28 Tagen zur Feststellung der Würfeldruckfestigkeit β_{W28} abgedrückt. Zum Zeitpunkt der Erwärmungsversuche wurden die restlichen 3 Würfel zur Ermittlung der Würfeldruckfestigkeit β_W geprüft. Außerdem wurde für jeden Würfel die Festbetonrohddichte ermittelt. Die Druckfestigkeiten β_{W28} und β_W sowie die Rohdichten enthält die Tabelle 3.2, angegeben sind die Mittelwerte aus jeweils drei Prüfungen.

Tabelle 3.2: Betonfestigkeiten (Würfel mit 15 cm Kantenlänge)
und Rohdichten

Versuchs- körper	Alter [Tage]	Würfeldruckfestigkeit [N/mm ²]	Rohdichte [kg/dm ³]
E-300	28	33	2,31
	139	36	2,29
A-300	28	34	2,32
	122	34	2,27
M-300	29	59	2,43
	124	66	2,42

Zur Ermittlung der im Versuchskörper vorhandenen Feuchtigkeit wurden aus jeder Stirnseite der Versuchskörper, unmittelbar vor dem Erwärmungsversuch, 10 kleine Betonproben herausgebrochen. Um ein übermäßiges Austrocknen der Stirnseiten während der Lagerungszeit zu verhindern, wurden die Stirnseiten sofort nach dem Ausschalen der Versuchskörper mit einer Wachsschicht versiegelt.

3.2.2 Temperaturmeßquerschnitte

In jedem Versuchskörper wurden drei Temperaturmeßquerschnitte angeordnet. Ihre Lage entsprach der Schnittführung I, II und III im Bild 3.1. Der Abstand der Meßquerschnitte betrug 60 cm, wobei der mittlere Meßquerschnitt in halber Versuchskörperlänge angeordnet war. Der gesamte Temperaturmeßbereich war ausreichend weit von den Brandkammerwänden entfernt, um eine annähernd gleiche Brandraumtemperaturbeanspruchung der drei Meßquerschnitte zu erreichen.

Die Meßquerschnitte waren über die Versuchskörperlänge so verteilt, daß jedem unterschiedlich ausgebildeten Querschnittsbereich ein Meßquerschnitt zugeordnet war: Meßquerschnitt I lag im Bereich des nicht angewouteten Kammerbetons, Meßquerschnitt II und III lagen im Bereich des angewouteten Kammerbetons, wobei sich im Bereich von Meßquerschnitt II die angeschweißte Stegverstärkung befand (s. Bild 3.1).

In jedem Meßquerschnitt waren 23 Meßstellen angeordnet. Die Meßstellen 1 bis 10 lagen am Stahlprofil, die Meßstellen 11 bis 19 im Betonquerschnitt und die Meßstellen 21 bis 23 an der Betonoberfläche.

Als Meßelemente wurden NiCr-Ni-Thermoelemente (Drahtdurchmesser 0,5 mm) verwendet.

Zur Temperaturmessung am Stahlprofil wurden die freien Drahtenden der Thermoelemente direkt auf die Stahlfläche appliziert, während sie für die Temperaturmessung im Beton zu Meßperlen verschweißt wurden. Zur Fixierung der Thermoelemente im Beton dienten besondere Halterungen in Form von Leitern mit "Holmen" aus 4 mm dicken Asbestzementstreifen und "Sprossen" aus 3 mm dicken Gewindestahlstangen. Die Asbestzementstreifen wurden im Abstand von 150 mm mit kleinen Stahlwinkeln rechtwinklig zur Versuchskörperlängsachse am Steg des Stahlprofils befestigt, so daß die Gewindestahlstangen parallel zur Versuchskörperlängsachse in der genauen Lage des vorgesehenen Meßpunktes verliefen. An die Gewindestahlstangen wurden die Thermoelemente mit dünnem Wickeldraht (Durchmesser 0,65 mm) befestigt.

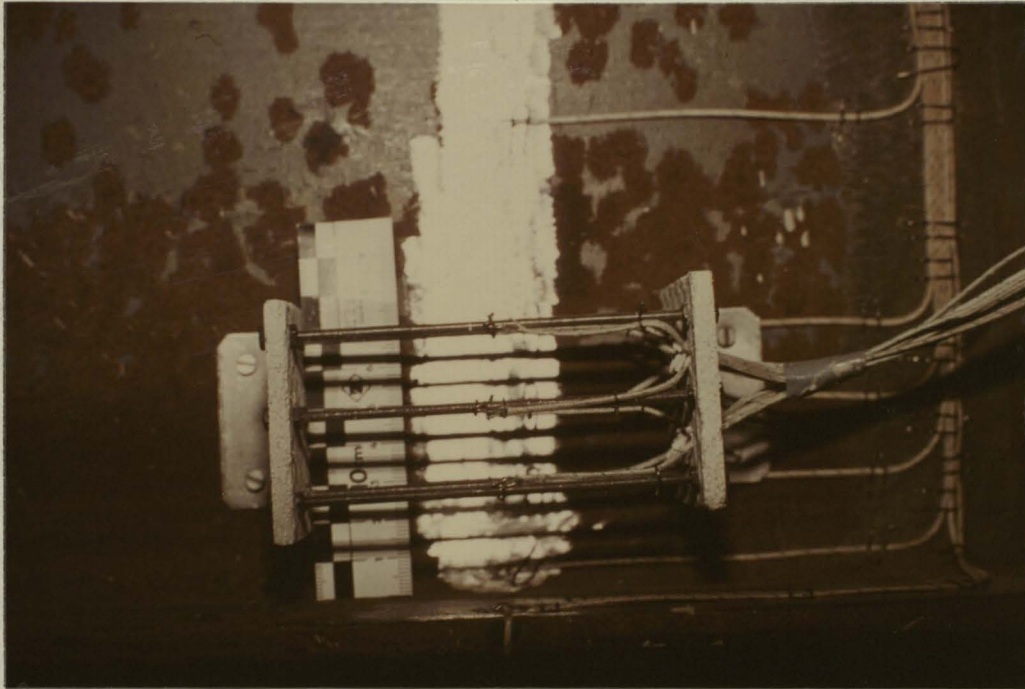


Bild 3.2: Temperaturmeßstellen im Meßquerschnitt I

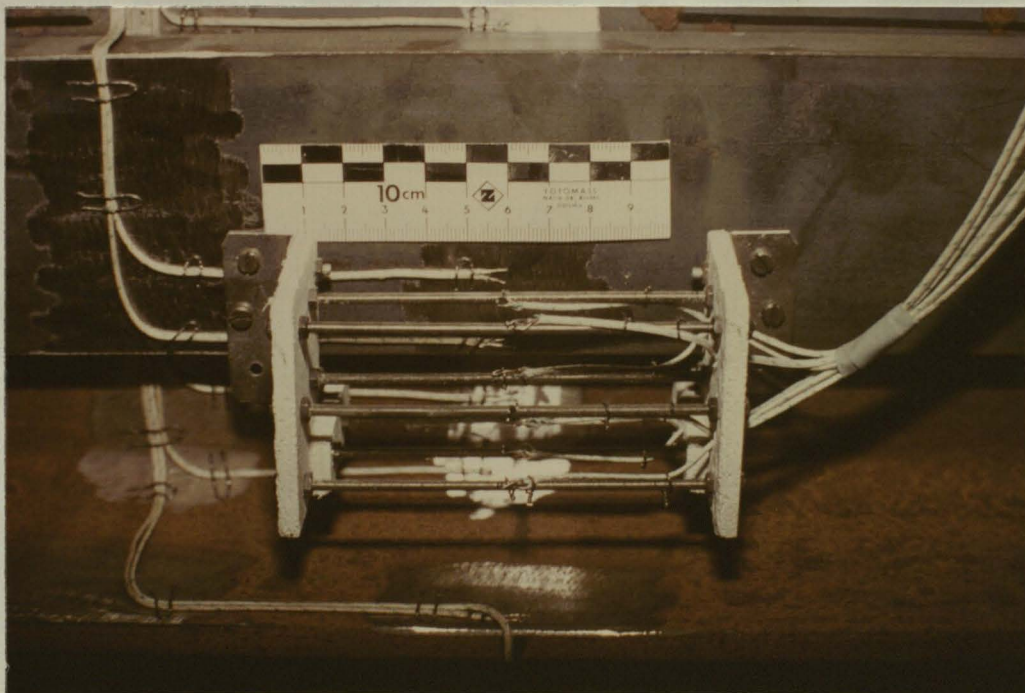


Bild 3.3: Temperaturmeßstellen im Meßquerschnitt II
(mit Stegverstärkung)

Hinter den Meßperlen wurden die Thermoelemente auf einer Länge von ca. 6 cm auf den Gewindestahlstangen geführt, um erstens im Thermodraht nahe an den Meßpunkten einen möglichst kleinen Temperaturgradienten zu erhalten, und um zweitens im Meßbereich möglichst jede Störung des Temperaturfeldes durch kreuzende Thermoelemente zu vermeiden. Am Ende der Gewindestahlstangen wurden die Thermoelemente bereichsweise zusammengefaßt und dann gebündelt an der nichtbeflammten Bauteiloberfläche aus dem Betonquerschnitt geführt.

Die Anordnung der Meßperlen auf den Gewindestahlstangen gewährleistet nach /4/ eine genaue Lage der Meßpunkte und kann darüber hinaus infolge der guten Temperaturleiteigenschaften der Gewindestahlstangen örtliche Störungen im Betongefüge durch Lunker, große Zuschläge und dergleichen weitgehend wieder ausgleichen. Die Asbestzementstreifen besitzen etwas geringere Temperaturleiteigenschaften als der verwendete Beton.

Im Bild 3.4 ist die Lage der Temperaturmeßstellen in den drei Meßquerschnitten dargestellt. Die Temperaturmeßstellen wurden bei allen Versuchskörpern in einer Querschnittshälfte angeordnet. Bis auf die Meßstellen am Obergurt des Stahlträgers und der Meßstelle in der Betonplatte wurden in jedem Meßquerschnitt die entsprechenden Meßstellen in gleicher Höhenlage - bezogen auf die Innenkante des Untergurts - appliziert. Die seitlichen Abstände der Meßstellen wurden auf die Stegkante des Stahlprofils bezogen. Sie wurden in jedem Meßquerschnitt für die im Kammerbeton liegenden Meßstellen gleich groß festgelegt. Die seitlichen Abstände für die oberflächennahen Meßstellen und für die Meßstellen an den Gurtkanten wurden durch die Breite der Stahlträgergurte bestimmt.

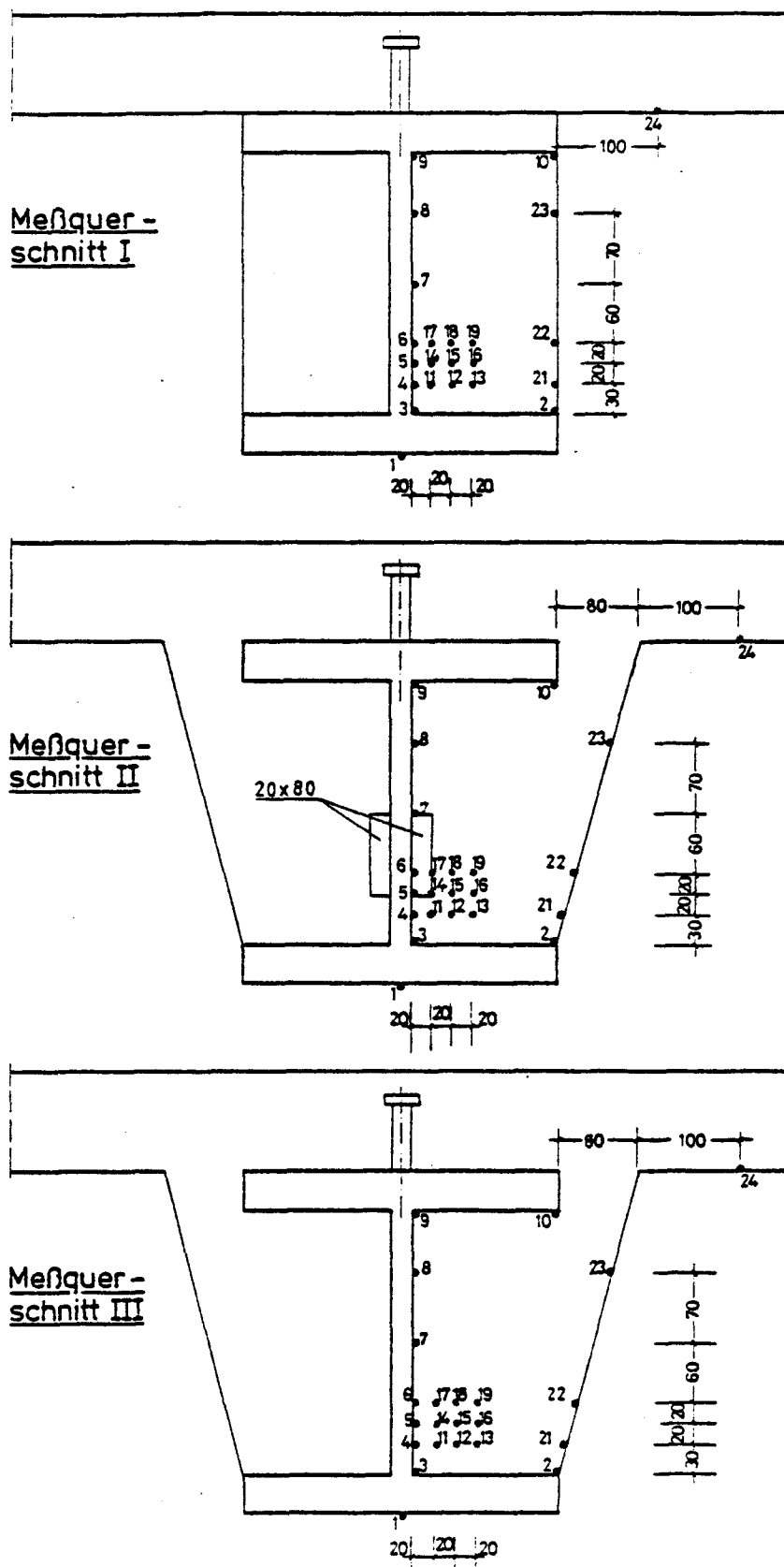


Bild 3.4: Anordnung der Temperaturmeßstellen

3.2.3 Lagerung und Trocknung

Die Versuchskörper wurden nach der Herstellung drei Tage lang feucht gehalten und danach in einer geschlossenen Halle gelagert, die annähernd das Normklima 20/65 aufwies. Die Lagerungszeit betrug für die einzelnen Versuchskörper zwischen 122 und 139 Tage und überschritt damit die in DIN 4102 Teil 2 /14/ geforderte Minimaldauer von 100 Tagen.

3.3 Versuchsaufbau und -durchführung

3.3.1 Brandraum und Beheizung

Die Versuchskörper wurden als obere Abdeckung einer Brandkammer von 3,60 m Länge und 4,00 m Breite eingebaut. Die lichte Brandkammerhöhe betrug 2,10 m. Die Wände bestanden aus geschweißten Stahlrahmen, die innenseitig - genauso wie der Boden - mit feuerfestem Beton bekleidet waren. Die nicht vom Versuchskörper überdeckte obere Brandkammeröffnung wurde durch Gasbetonplatten abgedeckt, die außen auf den Brandkammerstirnwänden auflagen und innen stumpf gegen die Betonplattenränder stießen, wobei die "Naht" zwischen Versuchskörper und Gasbetonplatte mit Mineralfaserwolle verstopft wurde.

Die Beheizung der Versuchskörper erfolgte durch je drei Ölbrenner an den beiden Längsseiten unter Verwendung von Heizöl EL nach DIN 51 603 und folgte der Einheits-Temperaturzeitkurve nach DIN 4102 Teil 2 /14/ bzw. ISO 834 /15/. Die Flammenachsen verliefen horizontal, 0,80 m über dem Brandkammerboden, senkrecht zur Längsachse der Versuchskörper. Die Flammenlänge betrug im allgemeinen etwa 0,8 bis 1,0 m. Die Rauchgase wurden durch Abzüge am Boden des Brandraums abgesaugt. Im Bild 3.5 ist die Anordnung der Ölbrenner dargestellt.

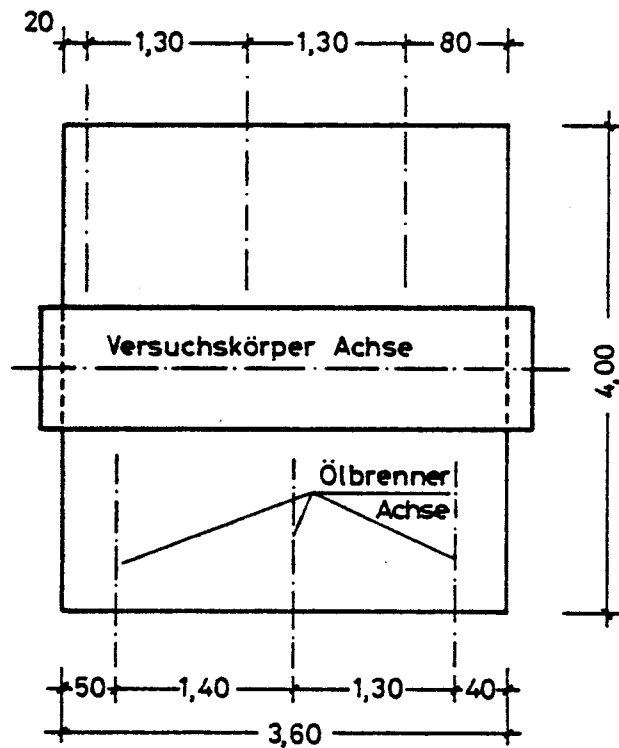
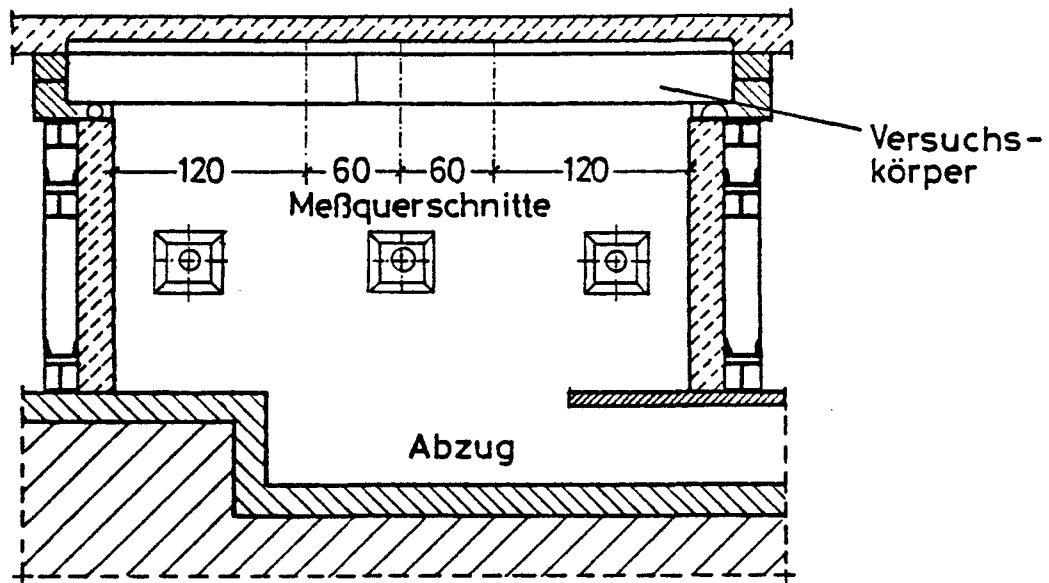


Bild 3.5: Anordnung der Ölbrenner

3.3.2 Einbau der Versuchskörper

Die Versuchskörper wurden als Einfeldkonstruktion mit einem festen und einem verschieblichen Auflager eingebaut. Beide Auflager waren gegen übermäßige Erwärmung durch Isolierung geschützt. Durch Variation der Auflagerhöhe wurde für alle Versuchskörper gleicher Abstand zwischen Trägeruntergurt und horizontaler Flammenachse eingehalten. Die Versuchskörper wurden so eingebaut, daß die einseitig in einer Querschnittshälfte angeordneten Temperaturmeßstellen jeweils in gleicher Brandraumlage positioniert waren. Da bei den Versuchen das Erwärmungsverhalten untersucht werden sollte, wurden die Versuchskörper ohne äußere Belastung untersucht. Bild 3.6 zeigt in Längs- und Querschnitt die Versuchsanordnung.

Längsschnitt



Querschnitt

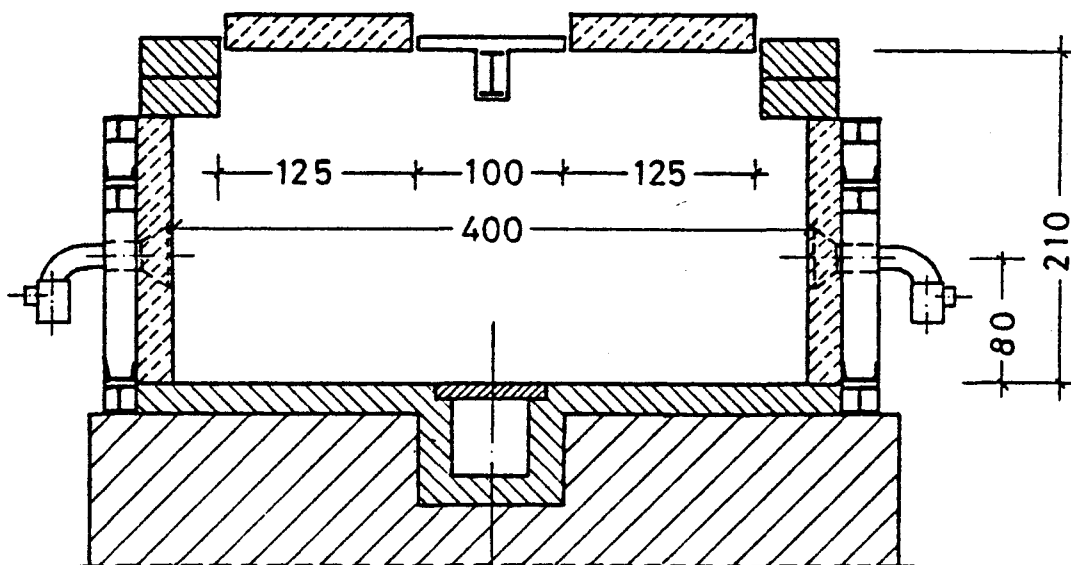


Bild 3.6: Versuchsanordnung

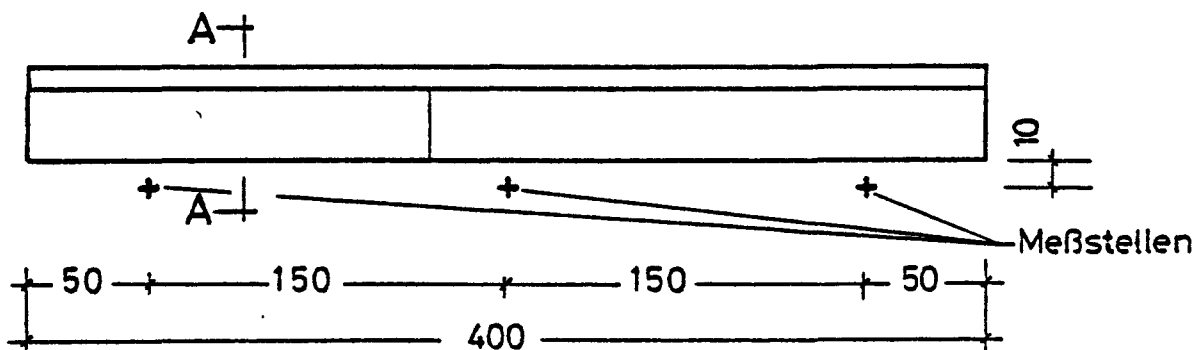
3.3.3 Meßprogramm

Das Meßprogramm umfaßt die Aufnahme der Temperaturen im Versuchskörper und im Brandraum. Die Meßwerte wurden im Abstand von zwei Minuten auf eine Magnetkassette übertragen und zusätzlich auf einem Papiermitschrieb ausgegeben. Die Aufzeichnungen der Magnetkassette wurden nach Versuchsende zur rechnergestützten Datenauswertung benutzt.

3.3.3.1 Messung der Brandraumtemperaturen

Mit NiCr-Ni-Thermoelementen (Durchmesser 3 mm) wurde an sechs Meßstellen die Brandraumtemperatur kontrolliert, wobei die Meßwerte gleichzeitig zur Steuerung der Einheits-Temperaturzeit-Kurve dienten. Aus Bild 3.7 ist die Lage der Brandraumtemperatur-Meßstellen zu ersehen.

Längsschnitt



Schnitt A-A

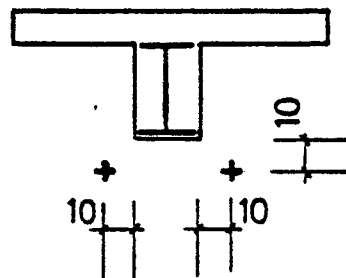


Bild 3.7: Lage der Brandraumtemperatur-Meßstellen

3.3.3.2 Messung der Temperatur in den Versuchskörpern

Die Temperatur in den Versuchskörpern wurde mit NiCr-Ni-Thermoelementen gemessen. Im Abschnitt 3.2.2 sind die Lage der Temperaturmeßstellen sowie ihre Bezeichnungen angegeben (Bild 3.4).

3.3.4 Sonstige Beobachtungen

Während der gesamten Branddauer wurde das Verhalten der Versuchskörper augenscheinlich beobachtet und protokolliert. Ergänzend zu den Beobachtungen an der nichtbeflammten, zugänglichen Bauteiloberseite wurde die beflamnte Bauteilunterseite durch Fenster in den Brandkammerwänden auf Feuchtigkeitsaustritt, eventuelle Abplatzungen und Rißbildung hin beobachtet.

3.4 Versuchsergebnisse

3.4.1 Brandraumtemperatur

In den drei Erwärmungsversuchen wurde die Einheits-Temperaturzeitkurve gemäß DIN 4102 Teil 2 /14/ im zulässigen Toleranzbereich eingehalten. Die Meßwerte sind als dunkel angelegtes Streuband in den Anlagen 11 bis 13 dargestellt.

3.4.2 Feuchtigkeitsgehalt der Versuchskörper

Zum Zeitpunkt der Erwärmungsversuche wurden pro Versuchskörper 20 Betonproben in einem Trockenofen bei einer Temperatur von 105 °C bis zur Gewichtskonstanz gelagert. Auf das Trockengewicht bezogen, ergaben sich Restfeuchtigkeiten in der Größenordnung von 4,3 v.H. bis 5,1 v.H..

3.4.3 Temperatur in den Versuchskörpern

Die Temperaturentwicklung in den Versuchskörpern ist in den Anlagen 14 bis 40 dargestellt. Zur größeren Übersichtlichkeit wurden für jeden Meßquerschnitt die Temperaturverläufe im Stahlprofil, im Betonquerschnitt und an der Betonoberfläche getrennt in einer gesonderten Anlage aufgezeichnet. Die Zuordnung der einzelnen Temperaturverläufe zu der Anlagennumerierung geht aus Tabelle 3.3 hervor.

Tabelle 3.3: Zuordnung von Anlagennummern und Meßwerten
(Temperaturverläufe)

Versuchskörper	Meßquerschnitt	Anlage Nr.		
		im Stahlprofil	Temperaturverlauf im Betonquerschnitt	an der Betonoberfläche
E-300	I	14	15	16
	II	17	18	19
	III	20	21	22
A-300	I	23	24	25
	II	26	27	28
	III	29	30	31
M-300	I	32	33	34
	II	35	36	37
	III	38	39	40

3.4.4 Sonstige Beobachtungen

3.4.4.1 Versuchskörper E-300

- 17. Versuchsminute: erste Risse auf der Oberseite im Bereich der Ecken
- 21. Versuchsminute: Feuchtigkeitsaustritt auf der Plattenoberseite
- 28. Versuchsminute: Pfützenbildung, Feuchtigkeitsaustritt an der Stirnseite entlang des Stahlprofilumrisses
- 48. Versuchsminute: Abtrocknen der Plattenoberfläche
- 60. Versuchsminute: starker Wasserdampfaustritt an den Stirnseiten im Bereich des Steges und des Obergurtes
- 70. Versuchsminute: Plattenoberfläche trocken
- 120. Versuchsminute: Versuchsende

3.4.4.2 Versuchskörper A-300

- 21. Versuchsminute: Rißbildung und Feuchtigkeitsaustritt auf der Plattenoberseite im Bereich des festen Auflagers
- 29. Versuchsminute: Risse in den Stirnseiten mit Feuchtigkeitsaustritt
- 31. Versuchsminute: Rißbildung und Feuchtigkeitsaustritt auf der Plattenoberseite im Bereich des beweglichen Auflagers
- 32. Versuchsminute: Pfützenbildung
- 54. Versuchsminute: Oberfläche beginnt abzutrocknen
- 65. Versuchsminute: Wasserdampf tritt in geringem Maß an den Stirnseiten aus
- 94. Versuchsminute: Plattenoberfläche abgetrocknet
- 120. Versuchsminute: Versuchsende

3.4.4.3 Versuchskörper M-300

- 18. Versuchsminute: erste Risse auf der Plattenoberseite im Bereich der Ecken
- 22. Versuchsminute: Feuchtigkeitsaustritt auf der Plattenoberseite
- 31. Versuchsminute: weitere Rißbildung, Feuchtigkeitsaustritt an den Stirnseiten entlang des Stahlprofilumrisses
- 34. Versuchsminute: verstärkter Feuchtigkeitsaustritt an den Stahlprofilumrissen
- 38. Versuchsminute: örtlich sehr starker Feuchtigkeitsaustritt an den Seitenflächen zwischen Meßquerschnitt II und III
- 48. Versuchsminute: Plattenoberseite beginnt abzutrocknen
- 107. Versuchsminute: Plattenoberseite abgetrocknet
- 120. Versuchsminute: Versuchsende

3.4.5 Auswertung der Versuchsergebnisse

Bei insgesamt $3 \times 3 = 9$ Meßquerschnitten mit jeweils 23 Temperaturmeßstellen, d.h. bei über 200 gemessenen Temperaturverläufen, ergibt sich eine große Anzahl von Darstellungsmöglichkeiten. Es erscheint sinnvoll, zunächst die Auswertung getrennt für die einzelnen Versuchskörper durchzuführen. Ausführlich werden die Versuchsergebnisse für den Versuchskörper E-300 erläutert; die Versuchsergebnisse für die Versuchskörper A-300 und M-300 werden daran anschließend in einer gerafften, summarischen Form ausgewertet.

In den Erwärmungsversuchen lagen die Temperaturen von einigen oberflächennahen Meßstellen über den Werten der Brandraumtemperatur. Dieser Effekt entsteht im wesentlichen dadurch, daß nach längerer Branddauer die "frei"-hängenden Brandraumthermoelemente stärker Energie abstrahlen als die an der Bauteiloberfläche angeordneten Thermolemente, die durch den umgebenden, erwärmten Beton an der Energieabgabe gehindert werden.

3.4.5.1 Versuchskörper E-300

Die oberflächennahen Meßstellen 21 bis 24 in den Meßquerschnitten (MQ) I, II und III sind in ihrem Temperaturverlauf fast identisch, d.h. diese oberflächennahen Temperaturentwicklungen sind unabhängig von der Größe des Versuchskörperquerschnitts. Im Bild 3.8 ist dafür exemplarisch die Temperaturentwicklung der Meßstelle 22 in den Meßquerschnitten I und III dargestellt.

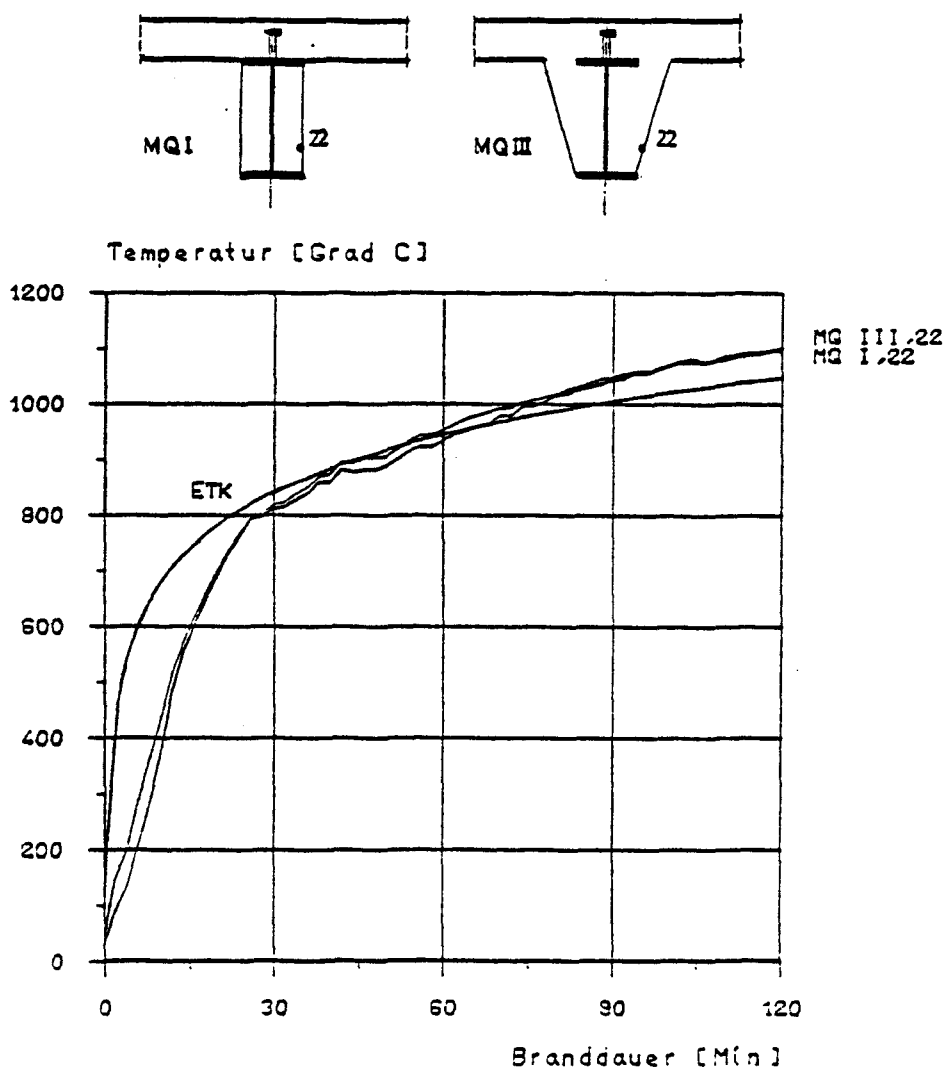


Bild 3.8: Vergleich der Temperaturentwicklung von oberflächennahen Meßstellen; Versuchskörper E-300

Im Bild 3.9 wird von den Meßquerschnitten I und III die Erwärmung des Stahlprofil-Obergurts verglichen. Bei fehlender seitlicher Betondeckung des Obergurts (Meßquerschnitt I) wird die Temperatur in Obergurtmitte nach 90 Minuten Branddauer über 200°C höher als im Meßquerschnitt III mit seitlicher Betondeckung, an der Seitenfläche des Obergurts (Meßstelle 10) beträgt der Temperaturunterschied ungefähr 400°C . Nach 90 Minuten Branddauer entsteht im Meßquerschnitt I im Obergurt ein Temperaturgradient von etwa 130°C , während im Meßquerschnitt III im Obergurt - bei 80 mm Betondeckung - eine annähernd gleichmäßige Temperaturverteilung vorhanden ist.

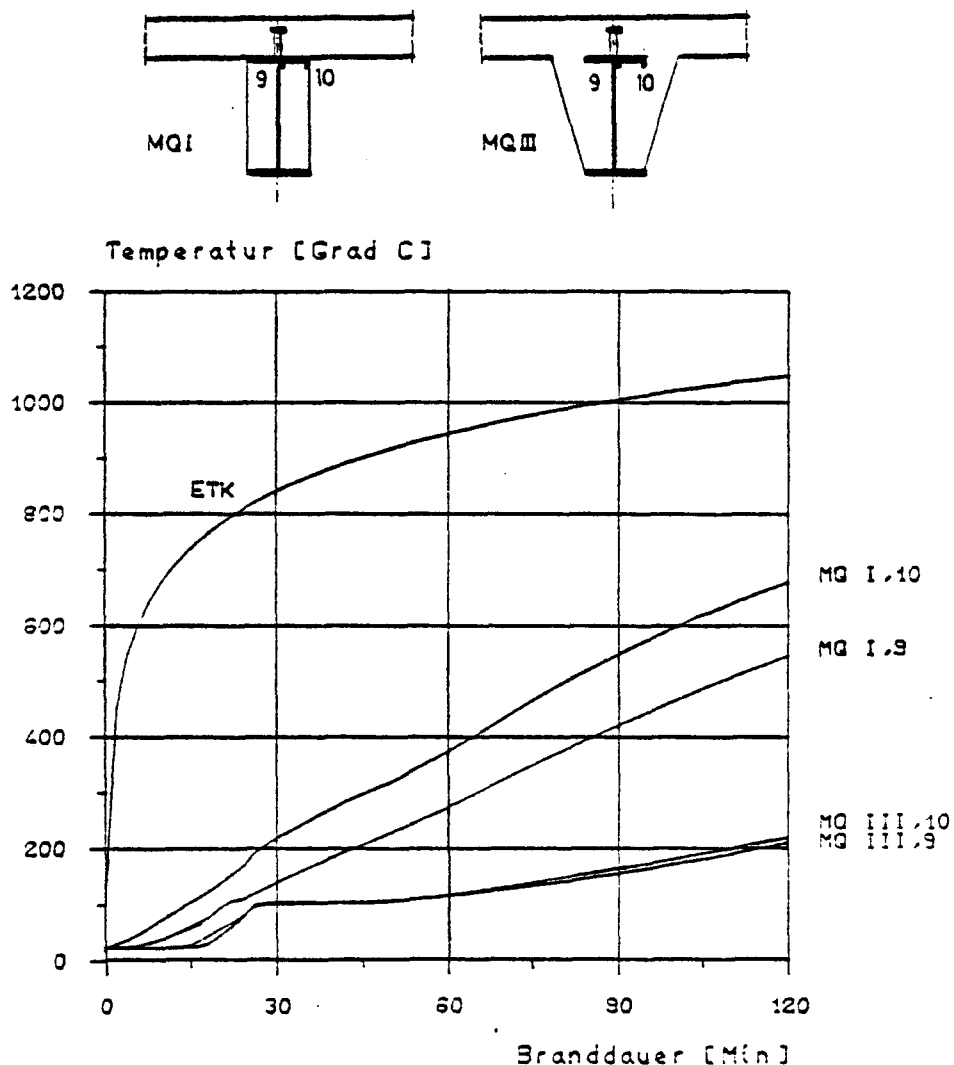


Bild 3.9: Vergleich der Temperaturentwicklung von Meßstellen im Obergurt des Stahlträgers; Versuchskörper E-300

Aus dem Vergleich der Temperaturverläufe an den Meßstellen 4 und 8 der Meßquerschnitte I und III wird der Einfluß der Voute auf die Temperaturentwicklung im Steg deutlich (s. Bild 3.10). An der nahe zum Untergurt liegenden Meßstelle 4 wird fast kein Unterschied im Temperaturverlauf zwischen Meßquerschnitt I und III festgestellt, d.h. die Voute bewirkt für diese Meßstelle keine Verzögerung des Temperaturanstiegs. An der Meßstelle 8 in der Nähe des Obergurts treten deutliche Temperaturunterschiede zwischen Meßquerschnitt I und III auf: Nach 90 Minuten Branddauer ist die Temperatur im nicht angevouteten Meßquerschnitt I um etwa 200 °C höher.

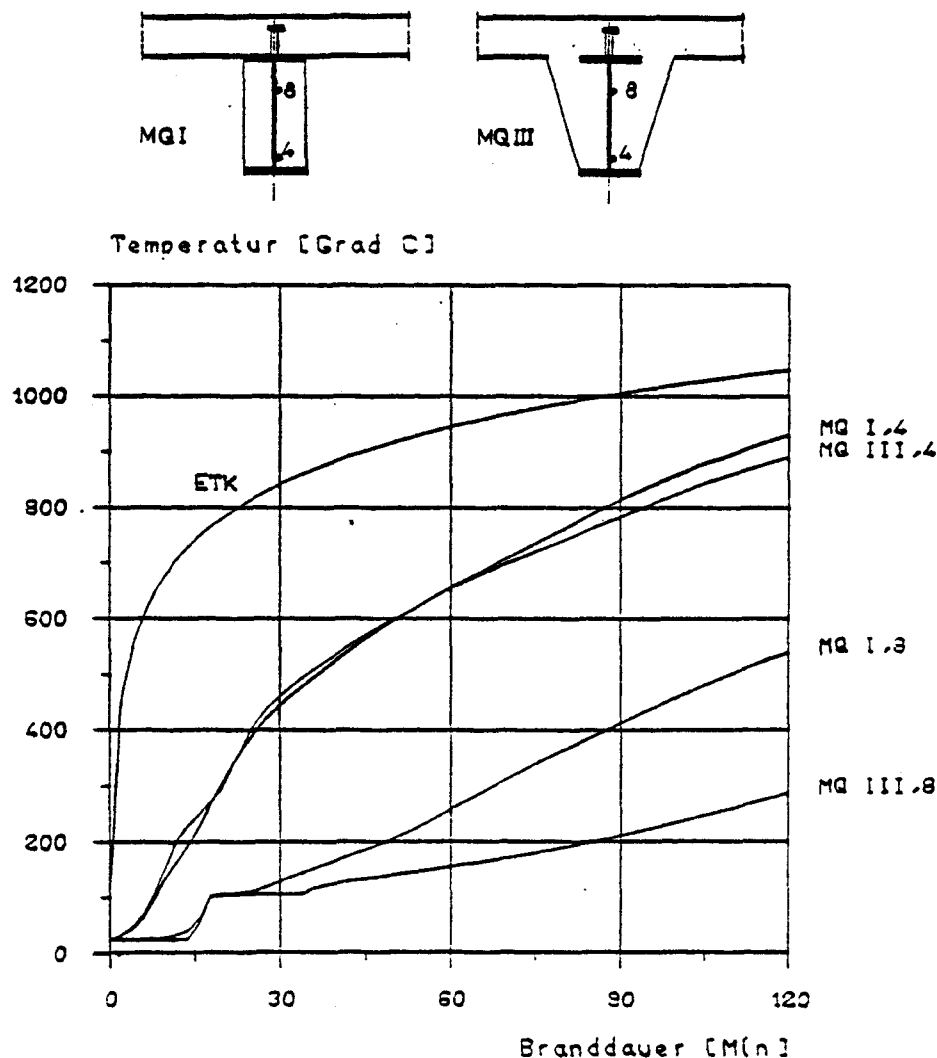


Bild 3.10: Vergleich der Temperaturentwicklung von Meßstellen am Steg des Stahlträgers bei unterschiedlicher Betondeckung; Versuchskörper E-300

Im Untergurt stellt sich während der Brandbeanspruchung ein Temperaturgefälle in Richtung zur Untergurtmitte (Steganschnitt) ein. Dieser Effekt ist unabhängig von der Meßquerschnittsausbildung, exemplarisch ist er im Bild 3.11 für den Meßquerschnitt II dargestellt. Das Temperaturgefälle erreicht sein Maximum mit einem Temperaturunterschied von über 100 °C nach ungefähr 20 Minuten Branddauer, danach wird es mit zunehmender Erwärmung des Untergurts kleiner.

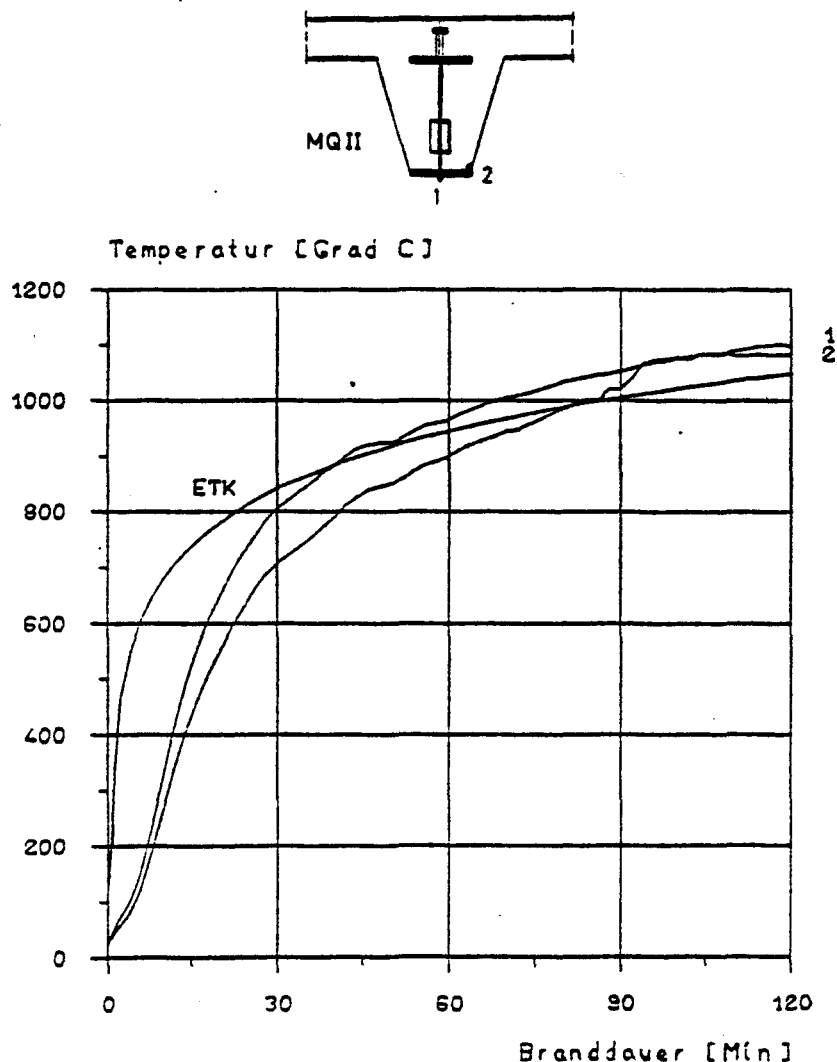


Bild 3.11: Vergleich der Temperaturentwicklung von Meßstellen am Untergurt des Stahlträgers; Versuchskörper E-300

Die über den Steg ins Querschnittsinnere fließende Wärmemenge reicht nicht aus, die gesamte Stegverstärkung auf die Stegtemperatur zu erwärmen. Bild 3.12 zeigt, daß in der Stegverstärkung ein Temperaturgefälle vom Steg (Meßstelle 5 und 6) zur betonseitigen Fläche der Verstärkung (Meßstelle 14 und 17) besteht. Am Temperaturverlauf der Meßstellen 14 und 17 ist deutlich der Temperaturhaltepunkt bei ungefähr 100 °C infolge Wasserverdampfung zu erkennen. Der entsprechende Effekt an der Meßstelle 6, die zwischen Steg und Stegverstärkung liegt, d.h. im "Stahlquerschnitt", ist vermutlich dadurch zu erklären, daß Wassermengen im Bereich der unterbrochenen Schweißnaht (Schrittnaht) in die Grenzfläche zwischen Steg und Stegverstärkung getrieben worden ist.

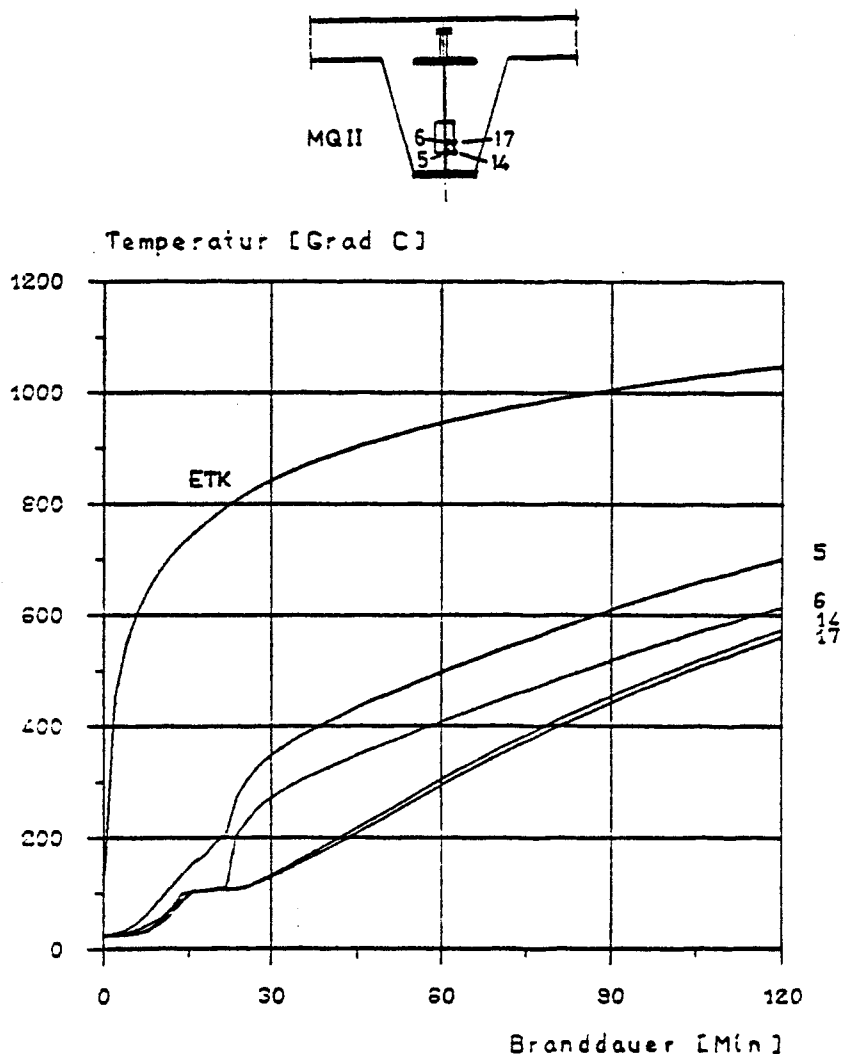


Bild 3.12: Vergleich der Temperaturentwicklung von Meßstellen am Steg und an der Stegverstärkung des Stahlträgers; Versuchskörper E-300

Im Bild 3.13 ist die Temperaturentwicklung am Steg des Stahlprofils für die Meßquerschnitte II (mit Stegverstärkung) und III (ohne Stegverstärkung) dargestellt. Es ist zu erkennen, daß in beiden Meßquerschnitten annähernd die gleiche Temperaturentwicklung stattfindet.

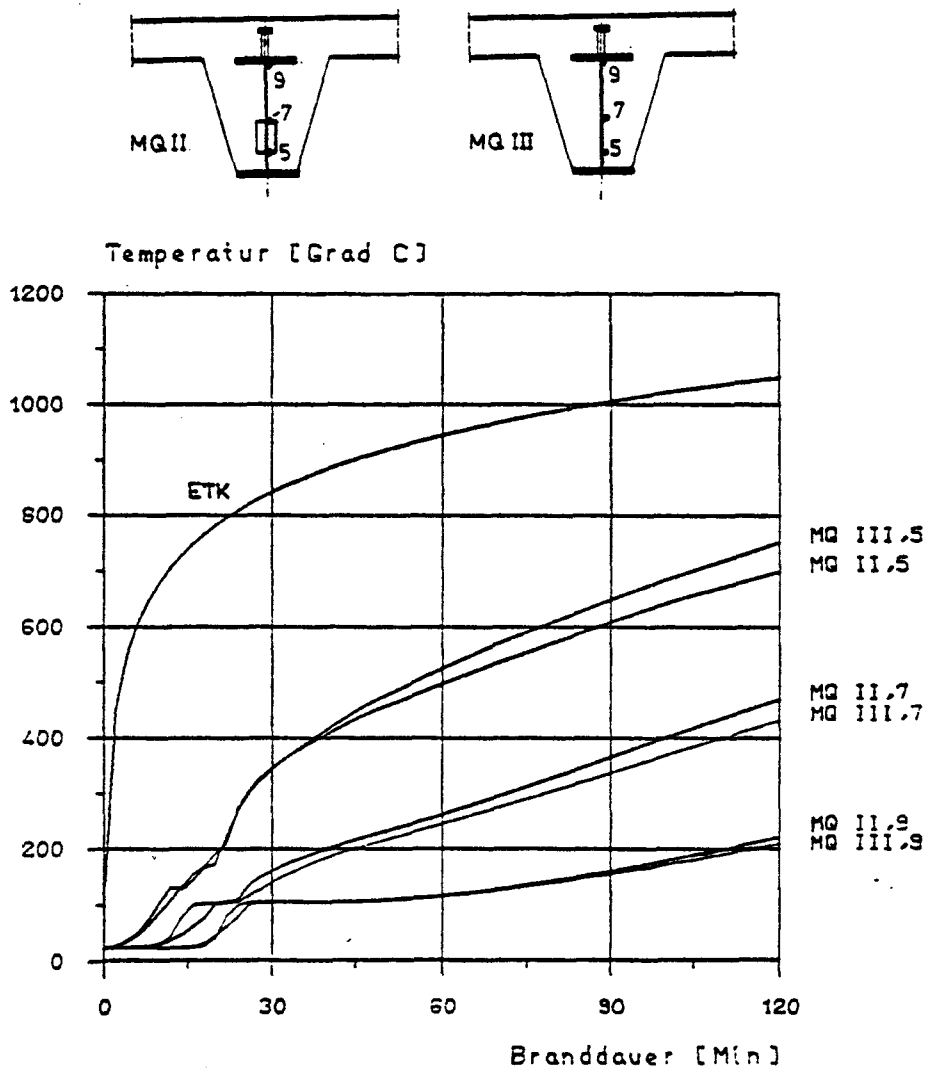


Bild 3.13: Vergleich der Temperaturentwicklung von Meßstellen am Steg des Stahlträgers mit und ohne Stegverstärkung; Versuchskörper E-300

3.4.5.2 Versuchskörper A-300

In den Anlagen 41 bis 46 wird für den Versuchskörper A-300 die Temperaturentwicklung verglichen für

- oberflächennahe Meßstellen (Anlage 41)
- Meßstellen am Obergurt des Stahlträgers (Anlage 42)
- Meßstellen am Steg des Stahlträgers bei unterschiedlicher Betondeckung (Anlage 43)
- Meßstellen am Untergurt des Stahlträgers (Anlage 44)
- Meßstellen am Steg und an der Stegverstärkung des Stahlträgers (Anlage 45)
- Meßstellen am Steg des Stahlträgers mit und ohne Stegverstärkung (Anlage 46)

3.4.5.3 Versuchskörper M-300

In den Anlagen 47 bis 52 wird für den Versuchskörper M-300 die Temperaturentwicklung verglichen für

- oberflächennahe Meßstellen (Anlage 47)
- Meßstellen am Obergurt des Stahlträgers (Anlage 48)
- Meßstellen am Steg des Stahlträgers bei unterschiedlicher Betondeckung (Anlage 49)
- Meßstellen am Untergurt des Stahlträgers (Anlage 50)
- Meßstellen am Steg und an der Stegverstärkung des Stahlträgers (Anlage 51)
- Meßstellen am Steg des Stahlträgers mit und ohne Stegverstärkung (Anlage 52)

3.4.6 Diskussion der Versuchsergebnisse

Im folgenden Abschnitt werden die Versuchsergebnisse schwerpunktmäßig für die Anforderungen der Feuerwiderstandsklasse F 90 ausgewertet, d.h. für einzelne Querschnittsbereiche (Untergurt, Steg, Kammerbeton usw.) wird der Verlauf der 500 °C-Isotherme studiert.

Erwärmung des Stahlträger-Untergurts

Im Bild 3.14 ist für die Versuchskörper E-, A- und M-300 die Branddauer dargestellt, nach der im ungeschützten Untergurt der Stahlträger die Temperatur von 500 °C erreicht wird. Die Untergurte mit großer Querschnittsfläche (HE 300 M) erwärmen langsamer als Untergurte mit kleiner Querschnittsfläche, wobei der Einfluß der Untergurtbreite gegenüber dem Einfluß der Untergurtdicke gering ist. Für handelsübliche Stahlträger mit Untergurtdicken $t \leq 40$ mm (z.B. HE 300 M mit $t = 39$ mm) wird eine mittlere Untergurttemperatur von 500 °C nach maximal 30 Minuten Branddauer erreicht.

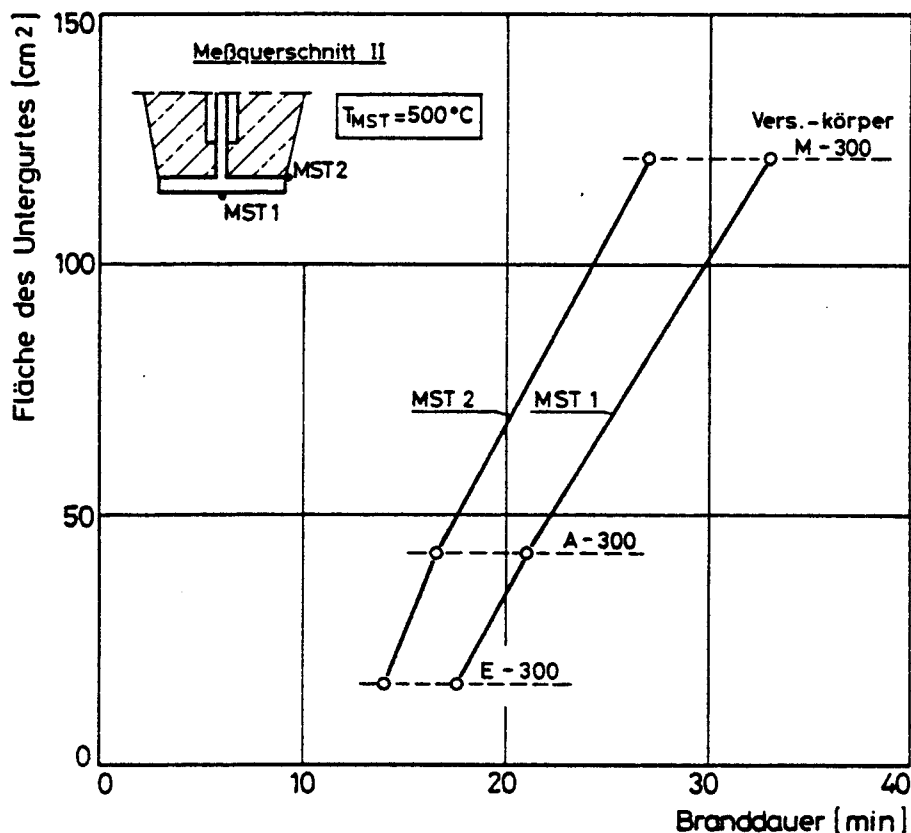


Bild 3.14: Branddauer bis zum Erreichen von $T = 500$ °C
im Untergurt des Stahlträgers

Erwärmung des Stahlträger-Steges

Die Erwärmung des Steges wird im unteren Stegbereich hauptsächlich durch die Dicke des Untergurts t beeinflusst; je dicker der Untergurt, desto geringer die Erwärmung des unteren Stegbereichs. Aus Bild 3.15, in dem für die 30. und 90. Minute Branddauer die Temperaturprofile über die Steghöhe aufgetragen sind, wird ersichtlich, daß für größere Abstände vom Untergurt die Erwärmung im Steg weniger von der Untergurtdicke, sondern im wesentlichen von der seitlichen Betondeckung abhängt, d.h., bei Querschnitten ohne Voute von der Breite des Untergurts.

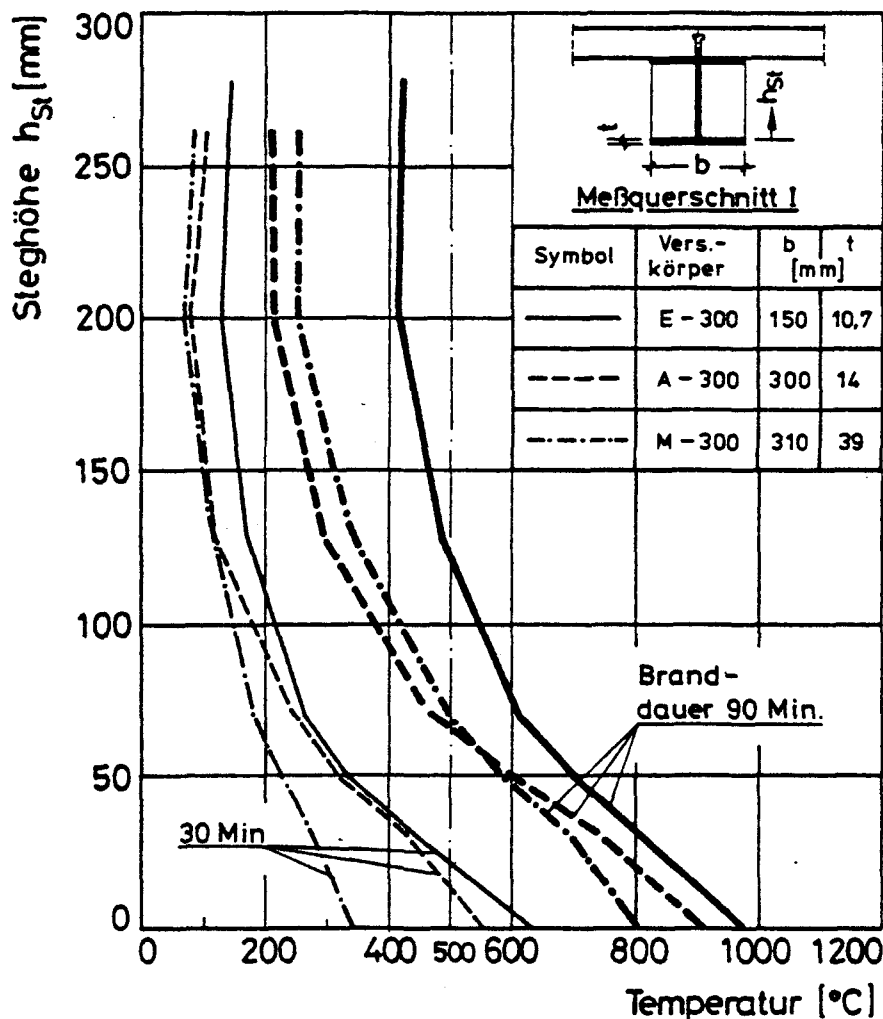


Bild 3.15: Temperaturprofile am Steg des Stahlträgers nach 30 und 90 Minuten Branddauer

Mit zunehmender Branddauer verschiebt sich der Übergang zwischen dem Stegbereich, dessen Erwärmung von der Untergurtdicke bzw. der Betondeckung abhängt nach unten, so daß der Bereich des Steges kleiner wird, dessen Erwärmung i.w. von der Untergurtdicke beeinflusst wird.

Aus dem Temperaturprofil von Versuchskörper E-300 wird deutlich, daß die vorhandenen Abmessungen mit $b/d = 150/300$ mm Mindestabmessungen darstellen, um Bereiche im Stahlträger zu erhalten, in denen nach 90 Minuten Branddauer die Temperatur kleiner als 500°C ist.

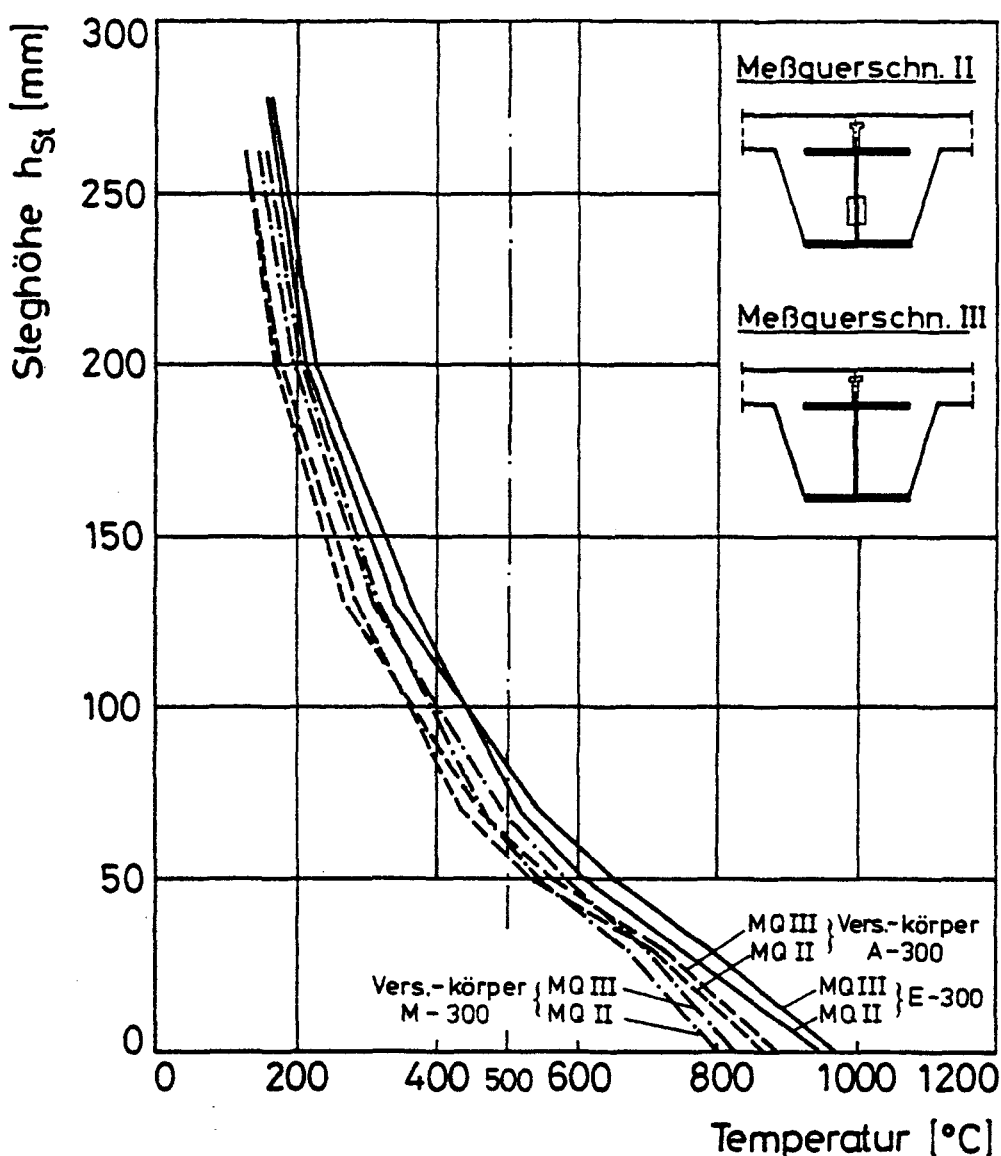


Bild 3.16: Vergleich der Temperaturprofile am Steg des Stahlträgers nach 90 Minuten Branddauer: Meßquerschnitt II (mit Stegverstärkung) und Meßquerschnitt III (ohne Stegverstärkung)

Im Bild 3.16 wird die Temperaturentwicklung am Steg des Stahlträgers nach 90 Minuten Branddauer für den Meßquerschnitt II (mit Stegverstärkung) und für den Meßquerschnitt III (ohne Stegverstärkung) gezeigt. Der Temperaturunterschied zwischen den beiden Meßquerschnitten ist über die gesamte Steghöhe sehr gering ($\Delta T < 20\text{ }^{\circ}\text{C}$). Typisch für die Temperaturverteilung ist es, daß im unteren Stegbereich die Temperaturen des Querschnitts ohne Stegverstärkung geringfügig über den Temperaturen des Querschnitts mit Stegverstärkung liegen. Im mittleren und oberen Stegbereich kehren sich die Verhältnisse um. Verursacht werden diese Unterschiede im Temperaturverlauf dadurch, daß bei gleicher Wärmezufuhr beim Querschnitt mit Stegverstärkung eine größere Stahlmasse erwärmt werden muß als beim Querschnitt ohne Stegverstärkung. Entsprechend niedriger sind die Temperaturen im Querschnitt mit Stegverstärkung. Gleichzeitig bedingt die größere Masse eine bessere Wärmespeicherung, so daß im Querschnitt mit Stegverstärkung im mittleren und oberen Stegbereich geringfügig höhere Temperaturen auftreten, als im Querschnitt ohne Stegverstärkung.

Erwärmung des Kammerbetons

Die Temperaturverläufe im Kammerbeton nach 90 Minuten Branddauer werden für die Querschnitte ohne Voute (Meßquerschnitt I) exemplarisch für eine horizontalen Schnitt, 50 mm über dem Untergurt, im Bild 3.17 dargestellt. Die Querschnittsbereiche mit Temperaturen $T \leq 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ sind punktiert gekennzeichnet. Es bilden sich in den Versuchskörpern A-300 und M-300 seitlich neben dem Steg des Stahlträgers Bereiche mit "Temperatursenken" aus. Im Versuchskörper E-300 treten solche Bereiche nicht auf. Die Auswertung der gemessenen Temperaturen für horizontale Schnitte in unterschiedlicher Höhenlage zeigt, daß in Meßquerschnitten ohne Voute (MQ I) die Lage und die horizontale Ausdehnung der Bereiche mit Temperatursenken stark von der Querschnittsbreite b abhängen.

Ähnliche Ergebnisse ergibt die Auswertung der Temperaturmessungen im Meßquerschnitt mit Vouten (MQ III). Hier liegen die Bereiche mit Temperaturen $T \leq 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ bei vergleichbarer Querschnittsbreite mit Meßquerschnitt I (ohne Voute) i.a. näher zum Untergurt.

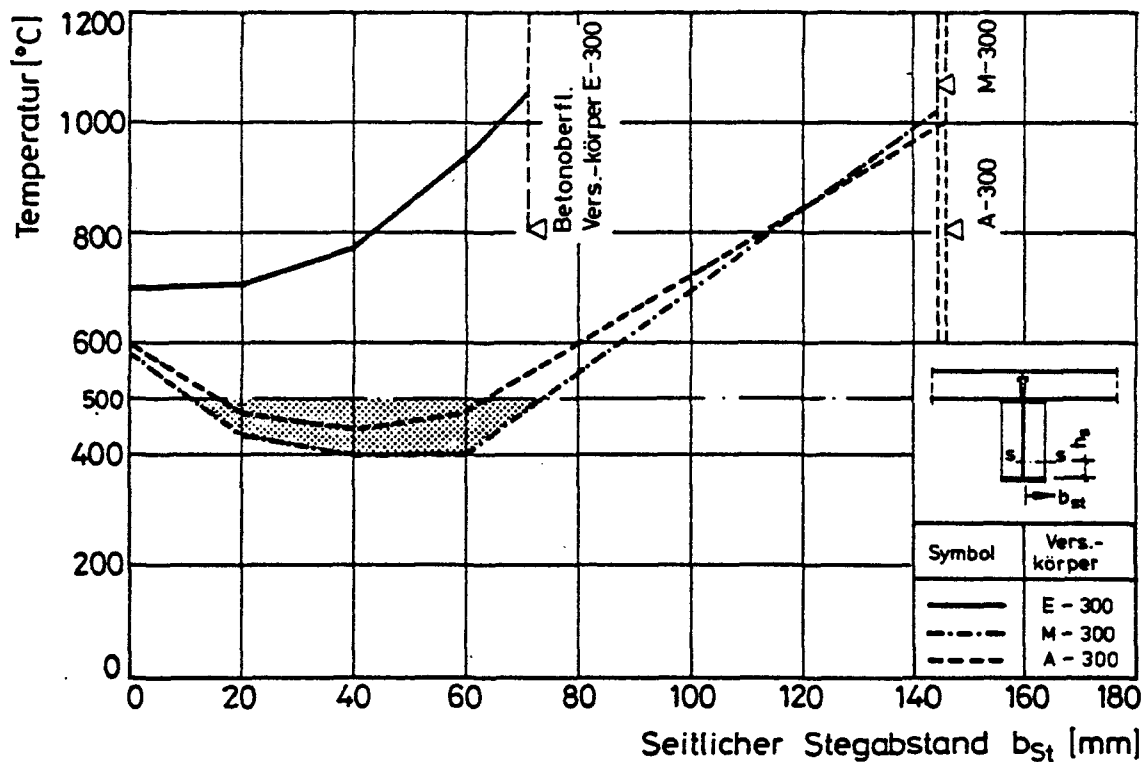


Bild 3.17: Horizontale Temperaturprofile im Beton nach 90 Minuten
Branddauer, Schnitt s-s: $h_s = 50 \text{ mm}$, Meßquerschnitt I

Erwärmung der Stegverstärkung

Im unteren Bereich der Stegverstärkung tritt nach 90 Minuten Branddauer ein starkes Temperaturgefälle vom Steg zur betonseitigen Kante der Stegverstärkung auf. Je höher die Schnittführung in die Stegverstärkung gelegt wird, desto geringer wird das Temperaturgefälle. Als mittlere Temperatur der Stegverstärkung kann annähernd die Temperatur des Steges in entsprechender Höhe festgesetzt werden.

4. Berechnung der Querschnittserwärmung

Die Temperaturverteilung im Stahlverbundquerschnitt wird im wesentlichen von den untereinander abhängigen Wärme- und Feuchtetransportvorgängen beeinflusst /18/. Nach den Gesetzen der irreversiblen Thermodynamik werden die relativ komplexen Zusammenhänge zwischen der Feuchteverteilung, dem Feuchtetransport und der Dampfdruckverteilung in dem mit Poren durchsetzten Betongefüge durch ein System von partiellen Differentialgleichungen erfaßt. Für die Berechnung der instationären Temperaturverteilung in praxisüblichen Bauteilquerschnitten hat es sich als statthaft erwiesen, die numerische Behandlung gegenüber der "genauen" thermodynamischen Berechnung zu vereinfachen. Für die numerische Vereinfachung sprechen im wesentlichen die Gründe, daß als Brandbelastung in der Regel der Zeitverlauf einer mittleren Brandraumtemperatur vorausgesetzt wird und daß bei der Mehrzahl der Berechnungen die zum Versuchszeitpunkt vorhandenen, genauen Wärmeübergangsbedingungen zwischen Brandraum und Bauteil fehlen. In /25/ wird ein Beispiel gegeben, wie stark die Temperaturfelder im Bauteil durch geringfügige Veränderungen der thermischen Randbedingungen beeinflusst werden können.

Die folgenden Vereinfachungen werden für die Berechnung der Temperaturentwicklung eingeführt:

- Es wird isotropes und homogenes Material vorausgesetzt, so daß die Fourier'sche Differentialgleichung der Wärmeleitung benutzt werden kann. Dabei werden Wärmequellen und -senken durch Modifizierung der Temperatur- und Wärmeleitfähigkeit berücksichtigt /8/.
- Der kapillare Wärmetransport bleibt unberücksichtigt.
- Die angenommene Wassermenge verdampft, sobald die Siedetemperatur erreicht ist.
- Der Wasserdampftransport hat keinen Einfluß auf den Wärmestrom.
- Die Betonfeuchte wird durch eine geeignete Veränderung der wärmephysikalischen Materialkennwerte des Betons berücksichtigt.
- Die mathematische Beschreibung des Wärmeübergangs berücksichtigt den Konvektions- und Strahlungsanteil.

4.1 Berechnungsverfahren

Für die numerische Berechnung der Temperaturverteilung wird das Finite-Elemente-Programm FIRES-T /13/ benutzt. Das Programm beschränkt sich auf die Berechnung der Fourier'schen DGL für den zweidimensionalen Fall Gl. (4.1), d.h. der Wärmefluß in Bauteillängsachse wird vernachlässigt.

$$c_p \cdot \rho \cdot \frac{\delta T}{\delta t} = \lambda \cdot \left(\frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} \right) \quad (4.1)$$

Die Randbedingungen für die Wärmeleitungsgleichung werden durch einen Ansatz beschrieben, der die Konvektion und die Strahlung berücksichtigt.

$$\frac{\delta q}{\delta t} = \alpha \cdot (T_F - T_S) + \sigma \cdot \epsilon \cdot \left(\left(\frac{T_{FA}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{SA}}{100} \right)^4 \right) \quad (4.2)$$

In Gleichung (4.2) ist α der Wärmeübergangskoeffizient infolge Konvektion, σ die Steffan-Boltzmann-Konstante, ϵ das Strahlungsverhältnis, T_F die Heißgastemperatur bzw. T_{FA} die absolute Heißgastemperatur und analog T_S bzw. T_{SA} die Oberflächentemperatur bzw. die absolute Oberflächentemperatur. Für die Stahlverbundträger-Querschnitte wurden für $\alpha = 15 \text{ W/m}^2\text{K}$ und für $\epsilon = 0,8$ angesetzt.

Anhand einer Wärmebilanzrechnung lassen sich die Gleichungen (4.1) und (4.2) zu folgender Gleichung (4.3) in Matrixschreibweise zusammenfassen:

$$C \cdot \underline{I} + K \cdot \delta \underline{I} = \underline{Q} \quad (4.3)$$

Mit C als Wärmekapazitätsmatrix, K als Wärmeleitfähigkeitsmatrix, \underline{Q} als externen Wärmeflußvektor und \underline{T} bzw. $\delta \underline{T}$ als Temperaturvektor bzw. seiner Ableitung nach der Zeit lassen sich die instationären Temperaturverteilungen berechnen. Um eine möglichst enge Annäherung zwischen den gerechneten und den gemessenen Temperaturwerten zu erhalten, hat sich für die vorliegenden Versuchskörper eine maximale Zeitschrittgröße von $t = 1$ Minute und eine geometrische Diskretisierung in quadratische Flächenelemente mit maximaler Seitenlänge von 2 cm als vorteilhaft erwiesen. Im Bereich des einbetonierten Stahlträgers wurden die Abmessungen der Flächenelemente bis auf die Dicke des Steges bzw. der Gurte verkleinert.

4.2 Wärmephysikalische Materialkennwerte

Die Bilder 4.1 und 4.2 zeigen die Rechenfunktionen der verschiedenen wärmephysikalischen Materialkennwerte in Abhängigkeit von der Temperatur für Beton mit überwiegend quarzhaltigen Zuschlägen (Normalbeton) und für Baustahl.

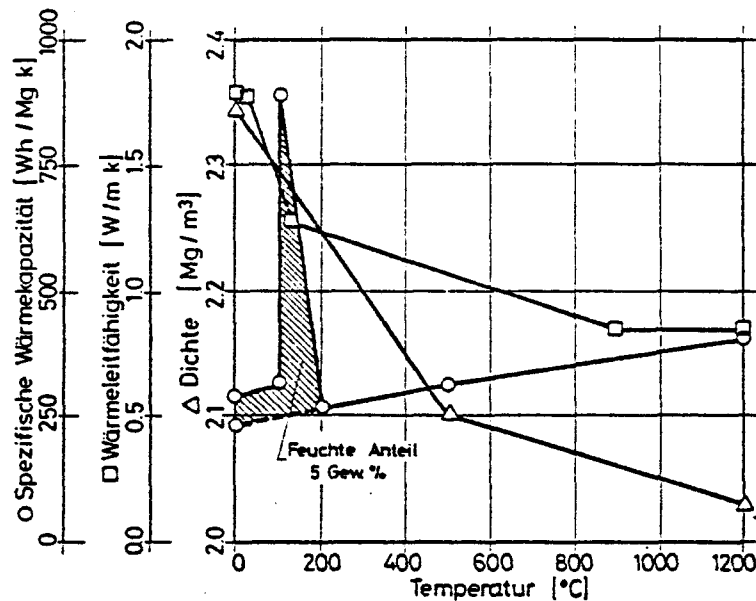


Bild 4.1: Thermische Stoffwerte für Normalbeton, Rechenwerte

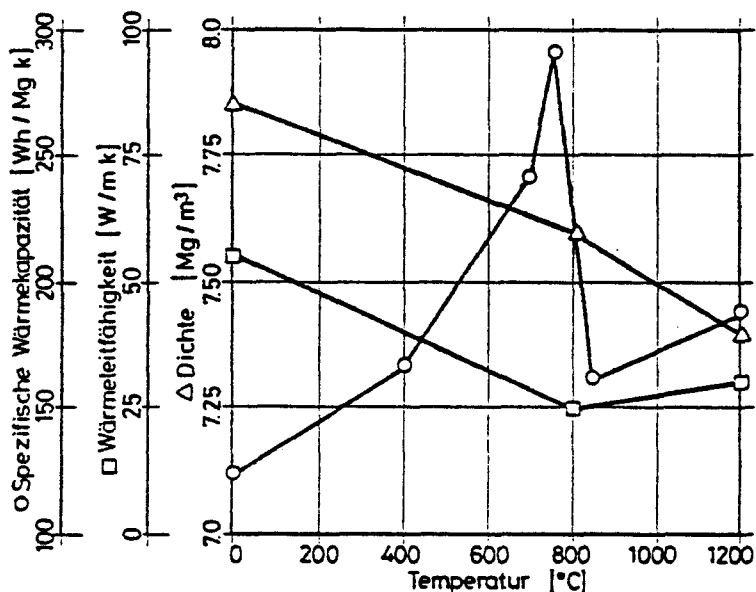


Bild 4.2: Thermische Stoffwerte für Baustahl, Rechenwerte

Die Betonfeuchte wird allein der spezifischen Wärmekapazität als temperaturabhängiges Rechengesetz zugeordnet, d.h. die Dichte und die Wärmeleitfähigkeit werden ohne Berücksichtigung der Betonfeuchte temperaturabhängig formuliert (s. Bild 4.1).

Die partielle Ableitung der spezifischen Enthalpie ($h(T)$) nach der Temperatur entspricht der spezifischen Wärmekapazität:

$$c_p(T) = \frac{\delta h(T)}{\delta T} \quad (4.4)$$

Dabei kann die spezifische Enthalpie als Addition der thermodynamischen Potentiale des trockenen Betons mit dem des anteiligen Wassers angenommen werden (Gleichung (4.5)):

$$h(T) = h^B(T) + u \cdot h^W(T) \quad (4.5)$$

Im Bild 4.3 ist in schematischer Darstellung der Zusammenhang zwischen der Betonfeuchte u , der Enthalpie des Wassers $h^W(T)$ und der spezifischen Wärmekapazität des Wassers c^W gegeben. Die Betonfeuchte wird als bilineare Funktion der Berechnung zugrunde gelegt. Der Temperaturwert, bei dem die Betonfeuchte vollkommen abgebaut ist, ist im allgemeinen von den Konstruktionsabmessungen sowie der Verteilung und Größe des Porenvolumens des Betons abhängig. Als weitere Vorgabe wird der temperaturabhängige Verlauf der mittleren spezifischen Wärmekapazität formuliert (Bild 4.3 c), so daß schließlich die spezifische Enthalpie des physikalisch gebundenen Wassers durch Integration von Gleichung (4.4) bestimmt werden kann. Die so gewonnenen Ergebnisse sind entsprechend Gleichung (4.5) zu denen des trockenen Betons zu addieren. Die Nachrechnungen von gemessenen Temperaturfeldern zeigen, daß mit den Ansätzen nach Gleichung (4.5) sowie den Funktionsverläufen nach Bild (4.3 a) und (4.3 c) der Einfluß der Feuchtigkeit auf die Temperaturverteilung in Stahlverbund-Querschnitten gut erfaßt werden kann.

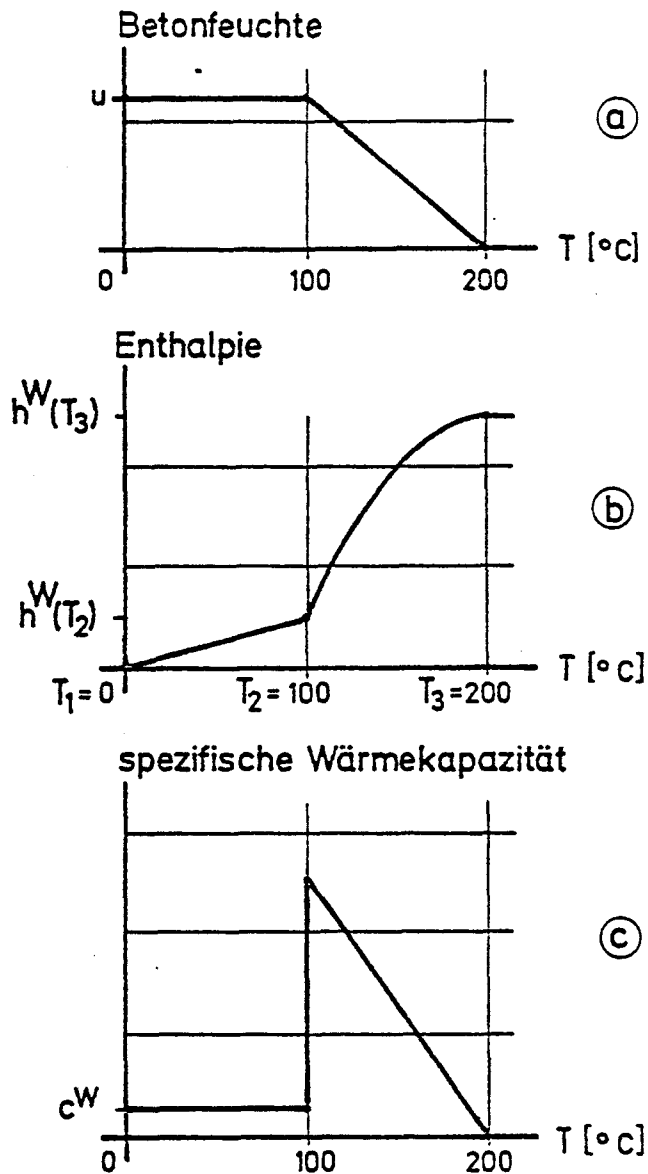


Bild 4.3: Schematische Darstellung des Ansatzes zur Berücksichtigung des Feuchtigkeitsgehaltes

4.3 Vergleich von Rechen- und Meßergebnissen

Am Beispiel der Temperaturverteilung im Versuchskörper A-300 soll die Qualität des numerischen Verfahrens dargestellt werden. Im Bild 4.4 wird die Temperaturentwicklung über der Steghöhe des Stahlträgers und im Bild 4.5 in einem horizontalen Schnitt, 70 mm über dem Untergurt verglichen. Die Temperaturverläufe sind jeweils für ausgesuchte Brandauern dargestellt. Die Übereinstimmungen zwischen Meß- und Rechenergebnissen sind befriedigend. Von besonderer Bedeutung ist es dabei,

daß in den Rechenergebnissen die Temperatursenken im Kammerbeton (Bild 4.5), 4 bis 6 cm vom Steg entfernt, zufriedenstellend erfaßt werden. In diesen Bereichen ist die Anordnung von brandschutztechnischer Zulage-Bewehrung sinnvoll.

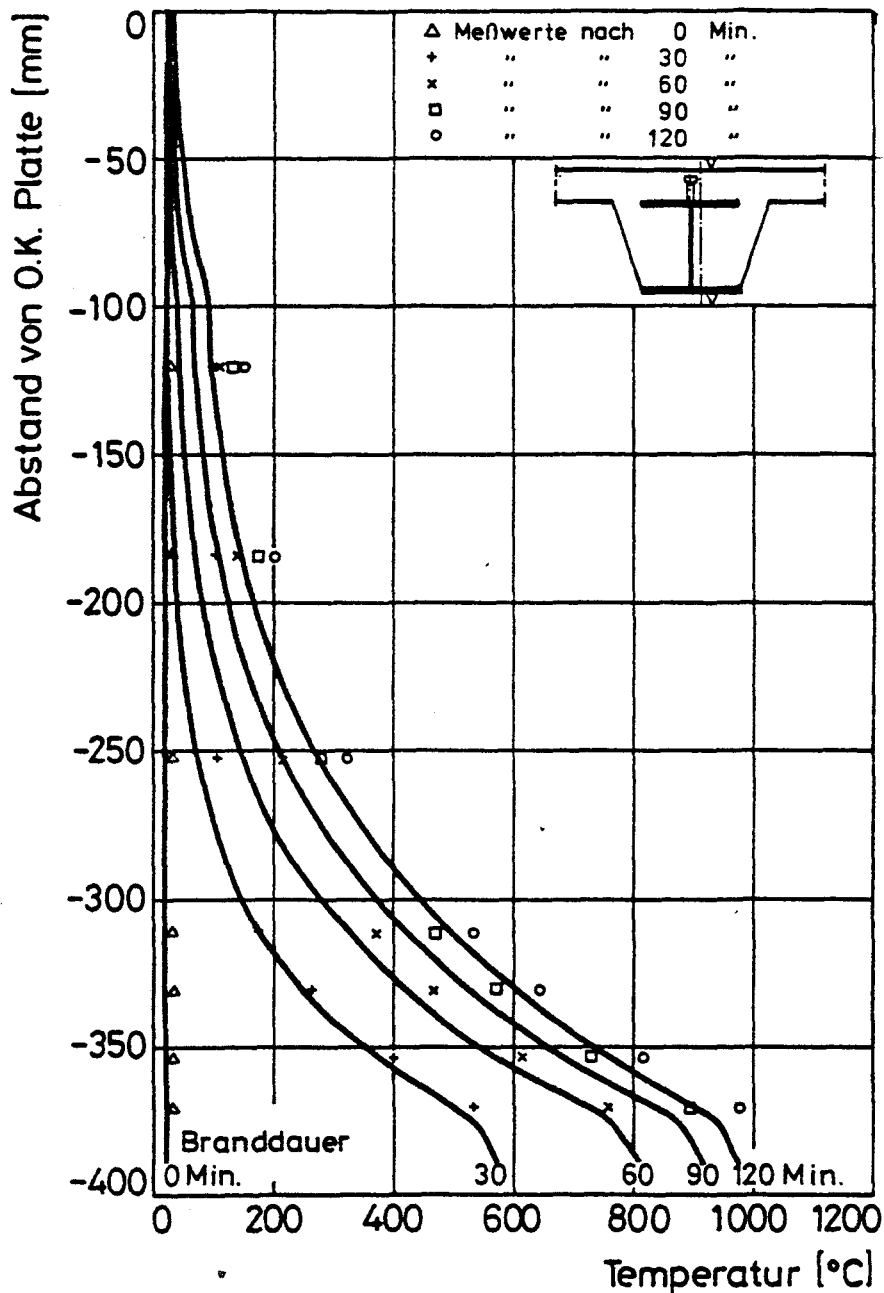


Bild 4.4: Vergleich zwischen Meß- und Rechenwerten:
Temperaturprofile am Steg des Stahlträgers

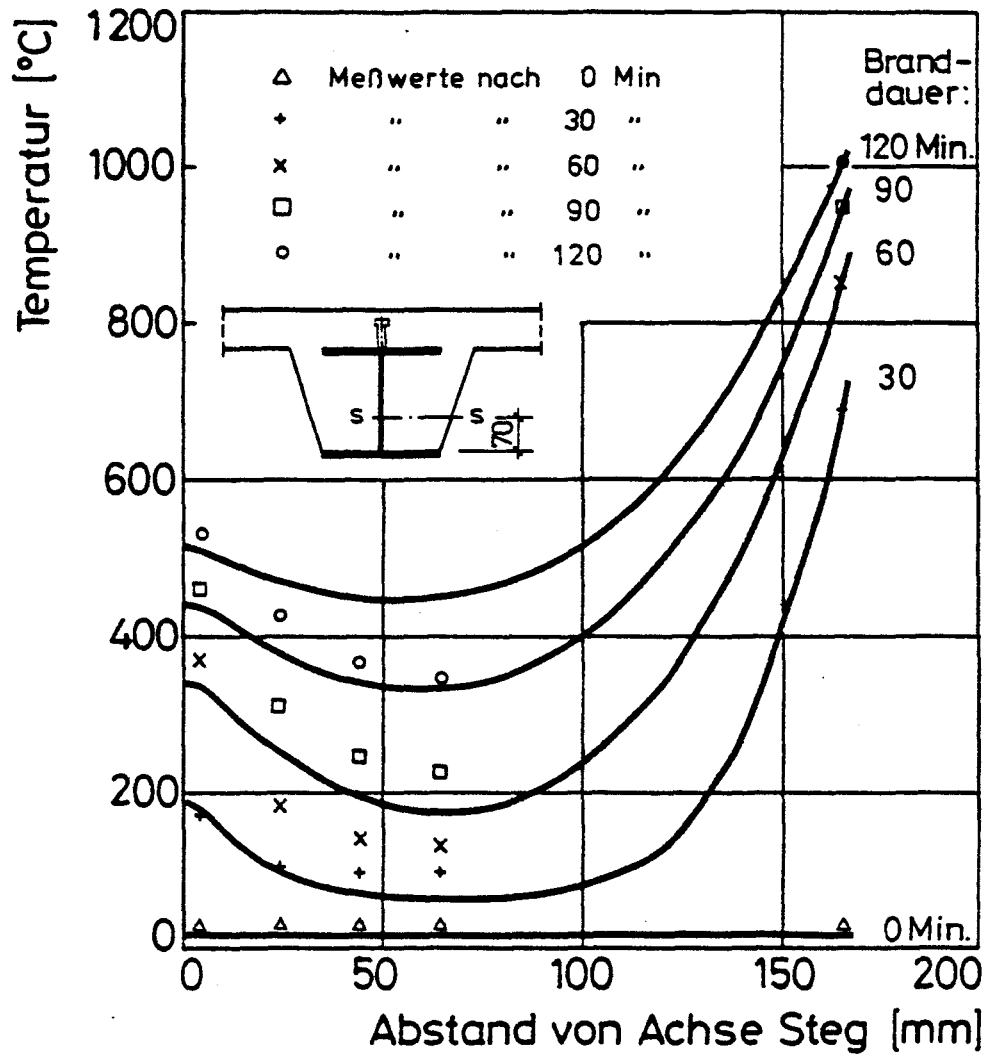


Bild 4.5: Vergleich zwischen Meß- und Rechenwerten:
Temperaturprofile im Kammerbeton

4.4 Zusammenfassung

Die Nachrechnung gemessener Temperaturverläufe in Stahlverbundquerschnitten zeigt deutlich, daß die Berücksichtigung der Betonfeuchte bei der Temperaturermittlung von entscheidender Bedeutung ist. Der einbetonierte Stahlträger behindert das Entweichen des Wasserdampfes, gleichzeitig entzieht der Wasserdampf dem Stahlprofil Anteile von Wärme und führt so zu einem verzögerten Wärmestrom in den umgebenden Beton. Andererseits wird dem Stahlträger über den ungeschützten Untergurt, der dem direkten Brandangriff ausgesetzt ist, zusätzliche Wärme zugeführt.

Die wirklichkeitsnahe Wiedergabe des Erwärmungsvorgangs bei Stahlverbundquerschnitten wird mit dem in Abschnitt 4.1 vorgestellten Berechnungsverfahren sowie den wärmephysikalischen Materialkennwerten von Abschnitt 4.2 zufriedenstellend realisiert. Das dargestellte Rechenverfahren wurde zusammen mit den beschriebenen thermischen Materialkennwerten inzwischen u.a. zur Berechnung des Erwärmungsverhaltens von Stahlverbundstützen benutzt /26, 27/. Dabei wurde eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Temperaturen erzielt.

5. Beurteilung der Untersuchungsergebnisse im Hinblick auf eine Anwendung in der Praxis

5.1 Ergebnisse der Erwärmungsversuche

Untersucht wurde das Erwärmungsverhalten von praxisüblichen Stahlverbundträger-Querschnitten unter Brandbeanspruchung nach DIN 4102. Die Auswertung der Erwärmungsversuche wurde schwerpunktmäßig für die Anforderungen der Feuerwiderstandsklasse F90 vorgenommen.

Es wurde festgestellt, daß die Abmessungen $b/h = 150/300$ mm Mindestabmessungen darstellen, um Bereiche im Stahlträger zu erhalten, in denen nach 90 Minuten Branddauer die Temperatur kleiner als 500°C ist.

In handelsüblichen Stahlträgern mit Untergurtdicken $t \leq 40$ mm wird nach maximal 30 Minuten Branddauer im seitlich und von unten ungeschützten Untergurt eine mittlere Temperatur von 500°C erreicht (siehe Bild 3.14).

In den ausbetonierten Kammern der Stahlträger bieten sich die Bereiche mit "Temperatursenken", d.h., Bereiche mit $T \leq 500^{\circ}\text{C}$ nach 90 Minuten Branddauer, für die Anordnung von Betonstahlzulagen an. Die Breite der Bereiche mit Temperatursenken und deren Lage im Kammerbeton konnte durch die Erwärmungsversuche so weit geklärt werden, daß sie für handelsübliche Stahlprofile mit Untergurtbreiten zwischen 150 mm und 300 mm für Verbundträger-Querschnitte ohne Voute nach Gleichung (5.1) in Verbindung mit Tabelle (5.1) und für Verbundträger-Querschnitte mit Voute nach Gleichung (5.1) in Verbindung mit Tabelle (5.2) angegeben werden können. Querschnitte, bei denen die Neigung der Voute gegen die Senkrechte kleiner als 15° ist, sind rechnerisch wie Querschnitte ohne Voute zu behandeln.

$$A = a_1 * b + a_2 \quad (5.1)$$

Die Koeffizienten a_1 und a_2 in Gleichung (5.1) sind in Tabelle (5.1) und (5.2) aufgeführt; die Untergurtbreite b ist in Gleichung (5.1) in Millimetern einzusetzen.

Tabelle 5.1: Koeffizienten für Gleichung (5.1) für
Verbundträger-Querschnitte ohne Voute

Verbundträger- querschnitt	A	a_1	a_2
ohne Voute	$h_{Z,S}$	-0,47	191
	$b_{Z,S}$	0,20	-20
	b_Z	0,14	1

Tabelle 5.4: Koeffizienten für Gleichung (5.1) für
Verbundträger-Querschnitte mit Voute

Verbundträger- querschnitt	A	a_1	a_2
mit Voute	$h_{Z,S}$	-0,27	121
	$b_{Z,S}$	0,27	-30
	b_Z	0,14	1

Die Größen $h_{Z,S}$ und $b_{Z,S}$ gelten für den Mittelpunkt des Bereichs, in dem Betonstahlzulagen eingelegt werden können. Die Größe $h_{Z,S}$ gibt den vertikalen Mindestabstand zum Untergurt (Oberkante) an, die Größe $b_{Z,S}$ den seitlichen Mindestabstand zum Steg des Stahlträgers und die Größe b_Z die maximale Breite des Zulagenbereichs. In den Bildern 5.1 und

5.2 werden Bereiche für Zulagen im Kammerbeton verglichen, die rechnerisch nach Gleichung (5.1) bzw. durch Auswertung der Erwärmungsversuche ermittelt wurden.

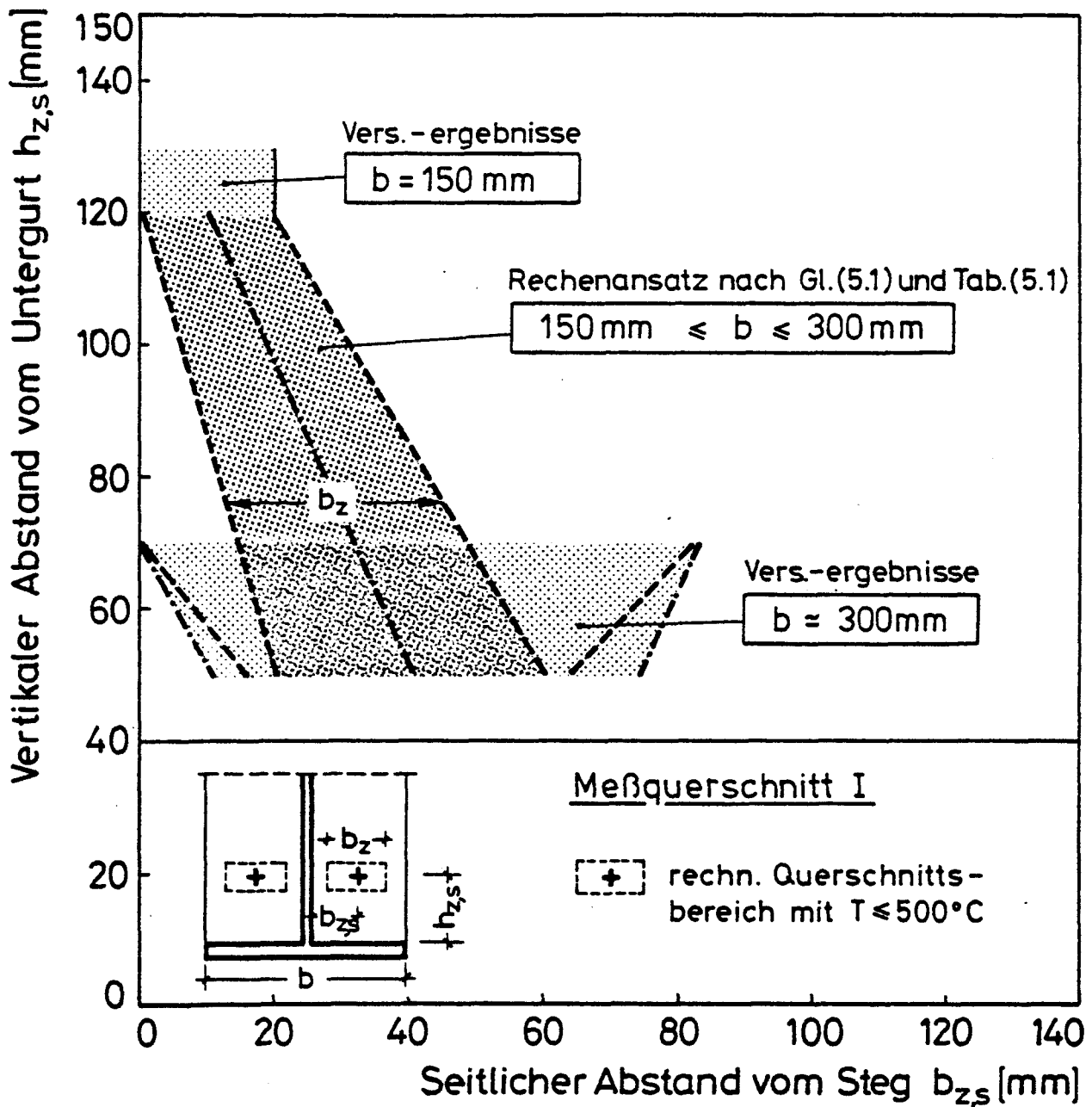


Bild 5.1: Bereiche im Kammerbeton mit $T \leq 500^\circ\text{C}$ nach 90 Minuten Branddauer, Verbundträger-Querschnitt ohne Voute

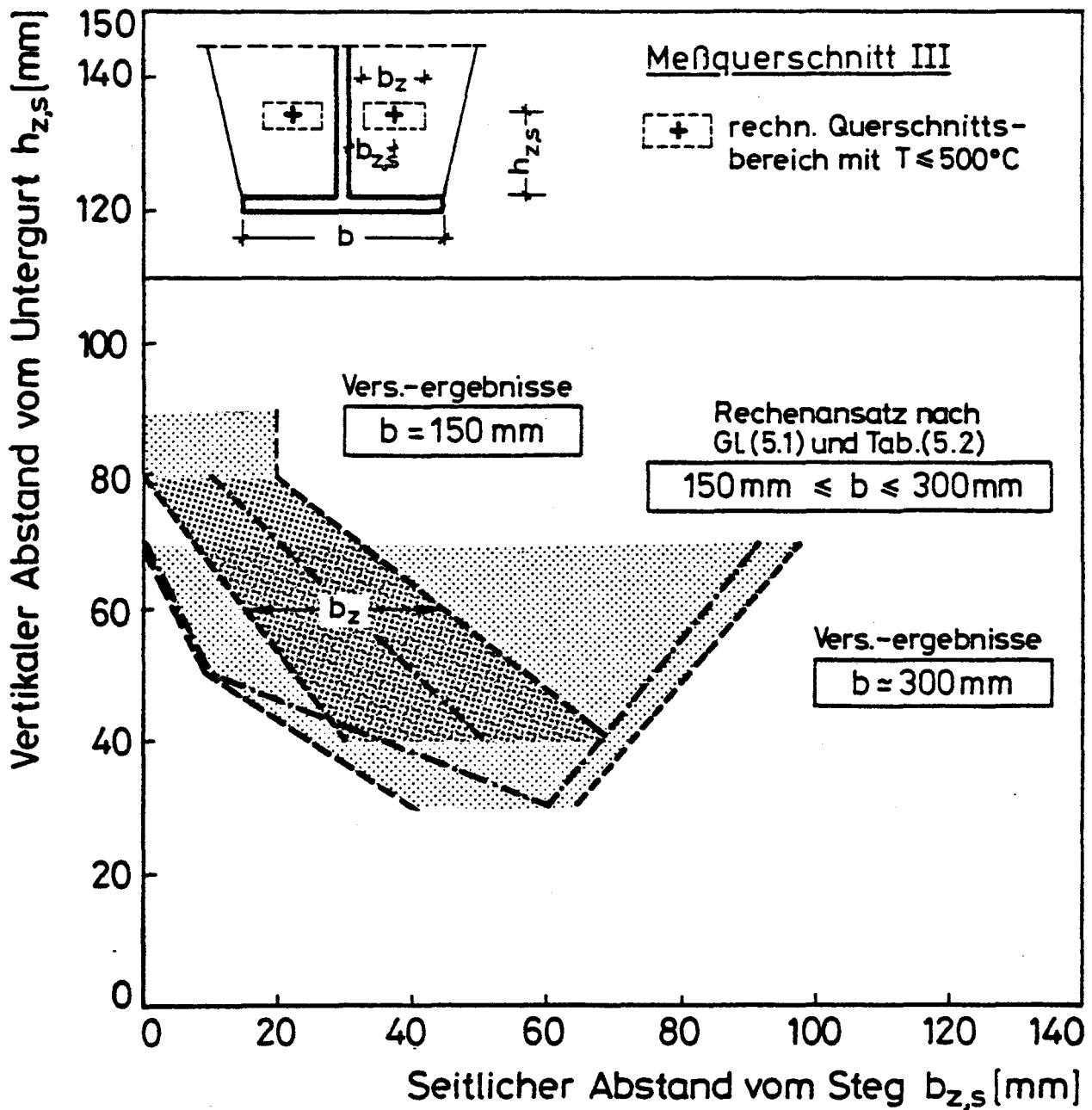


Bild 5.2: Bereiche im Kammerbeton mit $T \leq 500^\circ\text{C}$ nach 90 Minuten
Branddauer, Verbundträger-Querschnitt mit Voute

Für die Anordnung von Stegverstärkungen, deren mittlere Temperatur nach 90 Minuten Branddauer nicht größer als 500 °C werden soll, sind in Tabelle (5.3) die Achsabstände (= halbe Höhe der Stegverstärkung) von der Innenfläche des Untergurts angegeben. Für Untergurtbreiten zwischen 150 mm und 300 mm kann zwischen den Tabellenwerten linear interpoliert werden. Querschnitte, bei denen die Neigung der Voute gegen die Senkrechte kleiner als 15 ° ist, sind rechnerisch wie Querschnitte ohne Voute zu behandeln.

Tabelle 5.3: Achsabstände der Stegverstärkungen

Verbundträger- querschnitt	Achsabstand ¹⁾ der Stegverstärkung /mm/	
	b = 150 mm	b ≥ 300 mm
ohne Voute	120	70
mit Voute	80	60

- 1) Abstand zwischen Innenfläche des Untergurts und halber Höhe der Stegverstärkung

5.3 Ausblick

Bei statisch bestimmt aufgelagerten, überwiegend auf Biegung beanspruchten Stahlverbundträgern wird im Regelfall das Versagen durch das Verhalten des Zuggurtes im beflamnten unteren Querschnittsbereich bestimmt. Das Absinken der temperaturabhängigen Materialfestigkeit des Zuggurtes auf die im Bauteil vorhandene Spannung legt i.a. den Versagenszeitpunkt fest. Bei Kenntnis sowohl des instationären Temperaturfeldes im Querschnittsinneren wie der temperaturabhängigen Materialfestigkeit kann eine Abschätzung der Feuerwiderstandsfähigkeit von Stahlverbundträgern vorgenommen werden. Die Abschätzung der Feuerwiderstandsfähigkeit ist auf den Ersatz des temperaturbeanspruchten freiliegenden Untergurtes durch Zusatzlaschen am Steg oder zusätzlicher Betonstahlbewehrung in den ausbetonierten Kammern des Stahlprofils ausgelegt. Die in Abschnitt 5.1 aufbereiteten Untersuchungsergebnisse bieten die Möglichkeit, für praxisübliche Verbundträgerquerschnitte die erwärmungsmäßig günstigste Lage für die Stahlzulagen festzulegen. Der für den Brandschutz vorgesehene zusätzliche Zuggurt wird dabei so angeordnet, daß er nach 90 Minuten Branddauer nicht wärmer als 500 °C wird.

Die Zulagen erfüllen damit zunächst die erwärmungsmäßigen Voraussetzungen für das Erreichen einer bestimmten Feuerwiderstandsdauer. Untersuchungen an Verbundträgern und Decken mit eingebetteten Stahlträgern /8,10,12/ zeigen, daß neben den erwärmungsmäßigen Einflüssen u.a. folgende Querschnitts-Parameter die Feuerwiderstandsdauer beeinflussen:

- das Verhältnis der Stahlquerschnittsflächen $A_{\text{Gurt}}/A_{\text{Gesamt}}$
- das Verhältnis des Zulagenquerschnitts zum Gurtquerschnitt $A_{\text{Zulage}}/A_{\text{Gurt}}$
- das Verhältnis des Hebelarms der inneren Kräfte im Grenzzustand der Tragfähigkeit bei Normaltemperatur und bei Brandeinwirkung
- die Länge der Zulagen

Die Liste der Querschnitts-Parameter verdeutlicht, daß die Kenntnis über das Erwärmungsverhalten von Stahlverbundträgern den ersten Schritt in Richtung auf eine gezielte optimale brandschutztechnische Bemessung darstellt.

Um sie zu erreichen, müssen alle das Tragverhalten wesentlich beeinflussenden Komponenten (Belastungsgrad, Querkrafteinfluß, Dübelsicherung, Querschnitts-Parameter, u.s.w) bei der Bemessung berücksichtigt werden. Dadurch wird erreicht, daß neben der weitgehend realistischen Beurteilung des Tragverhaltens bei Brandbeanspruchung auch eine wirtschaftlich günstige Lösung durch möglichst geringen Materialeinsatz verwirklicht wird.

Für die Klassifizierung von Stahlverbundträgern nach DIN 4102 Teil 2 /14/ muß das Tragverhalten von charakteristischen Ausführungen in Brandversuchen unter Last bestätigt werden. Diese Brandversuche sind vor allen Dingen deshalb erforderlich, um den Einfluß der last- und temperaturabhängigen Bauteilverformungen zu erfassen. In /2/ wird über Brandversuche unter Last berichtet, die aufgrund großer Verformungen abgebrochen werden mußten bevor die zulässige Durchbiegungsgeschwindigkeit nach DIN 4102 Teil 2 erreicht wurde bzw. bevor ein Biegebruch-Versagen auftrat. In /2/ wird deshalb vorgeschlagen, als Versagenskriterium das Erreichen einer kritischen Durchbiegung zu definieren. Es liegen bisher keine systematischen Untersuchungen darüber vor, in welchem Maß das auf die kritische Durchbiegung bezogene Versagenskriterium mit Ergebnissen von Rechenansätzen übereinstimmt, die das Versagen unter Brandeinwirkung aus Berechnungen von Grenzzuständen der Tragfähigkeit bestimmen /5,11/.

6. Zusammenfassung

In der vorliegenden Untersuchung werden die Erwärmungsvorgänge in praxisüblichen Stahlverbundträger-Querschnitten behandelt. Es werden mehrere Querschnittsformen mit unterschiedlichen Stahlträgern untersucht.

Die Ergebnisse sind in Form von Temperatur-Zeit-Diagrammen und Temperatur-Orts-Diagrammen dargestellt. Daraus geht die Beeinflussung der Temperaturfelder infolge der einbetonierten Stahlträger hervor. Es werden Bereiche im Kammerbeton festgestellt, die besonders geeignet sind, die brandschutztechnische Zusatzbewehrung aufzunehmen. Für Verbundträger-Querschnitte mit und ohne Voute wurden Rechenansätze entwickelt, um die Lage und Größe der Bereiche für die Zusatzbewehrung im Kammerbeton ausrechnen zu können.

Für die rechnergesteuerte Ermittlung von Temperaturfeldern in Verbundträger-Querschnitten werden Rechengesetze für die thermischen Materialkennwerte von Beton und Baustahl vorgestellt. In einem theoretischen Ansatz wird gezeigt, wie die Betonfeuchte bei der Berechnung der Erwärmungsvorgänge berücksichtigt werden kann.

7. Literatur

- /1/ Arnault, P., Ehm, H., Kruppa, J.: Resistance Au Feu Des Poutres Mixtes. Febr. 1976, Centre Technique Industriel De La Construction Metallique, Puteaus, Dok.Nr. 2. 10. 20. - 4

- /2/ Herschelmann, F.: Untersuchungen über konstruktive Maßnahmen, die die Feuerwiderstandsdauer von Stahlverbundträgern verbessern. Unveröffentlichter Forschungsbericht des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, April 1982, durchgeführt im Auftrag des Bundesministers für Raumordnung und Städtebau, Bonn-Bad Godesberg (Az.: B I 7 - 81 07 05-278).

- /3/ DIN 4102 Teil 4, Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen. Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile, April 1981.

- /4/ Kordina, K., Ehm, H., von Postel, R.: Erwärmungsvorgänge in balkenartigen Stahlbetonbauteilen unter Brandbeanspruchung. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 230, 1975.

- /5/ Prüfungszeugnis Nr. 80 341; Institut für Baustoffkunde und Stahlbeton der Technischen Universität Braunschweig, 1980

- /6/ Roik, K., Bode, H., Haensel, J.: Erläuterungen zu den Richtlinien für die Bemessung und Ausführung von Stahlverbundträgern: Anwendungsbeispiele, Technisch wissenschaftliche Mitteilungen des Instituts für konstruktiven Ingenieurbau der Ruhr-Universität Bochum. Mitteilung Nr. 75 - 11, September 1973.

- /7/ Normenausschuß Bauwesen: Richtlinien für die Bemessung und Ausführung von Stahlverbundträgern, Berlin 1981.

- /8/ Kordina, K., und Meyer-Ottrens, C.: Beton-Brandschutz-Handbuch. Beton-Verlag, Düsseldorf, 1981.
- /9/ Jungbluth, O., Feyereisen, H., Oberegge, O.: Verbundprofilkonstruktionen mit erhöhter Feuerwiderstandsdauer. Bauing. 55(1980), S. 371 - 376.
- /10/ Gutachtliche Stellungnahme Nr. I 76 5770 zum Forschungsbericht "Resistance au feu des poutres mixtes". Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, 1976
- /11/ Kordina, K., Klingsch, W., Herschelmann, F.: Zur Frage des Brandverhaltens von Stahlverbundkonstruktionen, Berichtsband über das 2. Statusseminar des BMFT "Sicherheit, Brand- und Katastrophenbekämpfung, Notfallrettung", 1981.
- /12/ Prüfungszeugnis Nr. 83 821; Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen, Technische Universität Braunschweig, 1983
- /13/ Becker et al.: FIRES-T, A computer program for the fire response of structures-termal. Report No. UCB FRG 74-1, Berkeley, January 1974.
- /14/ DIN 4102 Teil 2, Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Bauteile, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen; September 1977.
- /15/ ISO: "Fire Resistance Tests - Elements of Building Construction". International Standard 834, November 1975.

- /16/ Wesche, J.: Brandschutz von Stahlträgern und Stahlprofilblechdecken und -dächern; Forschungsbericht des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1982.
Durchgeführt im Auftrag der Studiengesellschaft für Anwendungstechnik von Eisen und Stahl e.V., FKZ: Bau 6005/Akt.2.8.
- /17/ Jungbluth, O., Bangert, P., Hahn, J.: Feuerwiderstandsfähige Konstruktionen durch Profilverbund; Bericht zum Statusseminar 1983 "Brandverhalten von Stahl- und Stahlverbundkonstruktionen", Studiengesellschaft für Anwendungstechnik von Eisen und Stahl e.V., Verlag TÜV Rheinland, Köln, 1983.
- /18/ Herschelmann, F., Rudolph, K.: Berücksichtigung der Betonfeuchtigkeit auf Erwärmungsvorgänge in Stahlverbundträgern unter Brandbeanspruchung; Beitrag des Teilprojekts A1 im Arbeitsbericht 1981 - 1983 des Sonderforschungsbereichs 148 "Brandverhalten von Bauteilen"; Technische Universität Braunschweig, 1983.
- /19/ DIN 18 230, Vornorm: Baulicher Brandschutz im Industriebau, November 1982.
- /20/ Untersuchungsbericht Nr. 66 185 des Instituts für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, 1966.
- /21/ Prüfungszeugnis Nr. 81 007; Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1981. •
- /22/ DIN 1025 Teil 1-5, Formstahl, Oktober 1963.
- /23/ EURONORM 53-62

- /24/ DIN 1050, Stahl im Hochbau; Berechnung und bauliche Durchbildung, Juni 1968.
- /25/ Schneider, U., Dreyer, R.: Untersuchung über die Feuerwiderstandsdauer von Spannbetonbauteilen mit nachträglichem Verbund bei Brandbeanspruchung. Untersuchungsbericht des Instituts für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, 1971.
- /26/ Quast, U.; Rudolph, K.: Bemessungshilfen für Verbundstützen nach Feuerwiderstandsklassen; Forschungsbericht des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1984, durchgeführt im Auftrag der Studiengesellschaft für Anwendungstechnik von Eisen und Stahl e.V., FKZ: Bau 6004, Akt. 2.3.
- /27/ Quast, U.; Haß, R.: Auswirkung der Stützen/Riegel-Verbindung auf das Brandverhalten von Verbundstützen; Forschungsbericht des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1984, durchgeführt im Auftrag der Studiengesellschaft für Anwendungstechnik von Eisen und Stahl e.V., FKZ: Bau 6004, Akt. 2.2.

Verzeichnis der Anlagen

Anlage 1: Temperatur-Zeit-Verläufe am Stahlträger,
Verbundquerschnitt 1 (aus /1/, Vers.-Nr. 14)

Anlage 2: Temperatur-Zeit-Verläufe am Stahlträger,
Verbundquerschnitt 1 (aus /2/, Vers.-Nr. 13)

Anlage 3: Temperatur-Zeit-Verläufe am Stahlträger,
Verbundquerschnitt 1 (aus /2/, Vers.-Nr. S3)

Anlage 4: Temperatur-Zeit-Verläufe am Stahlträger,
Verbundquerschnitt 2 (aus /9/, Vers.-Nr. 1)

Anlage 5: Temperatur-Zeit-Verläufe am Stahlträger,
Verbundquerschnitt 3 (aus /12/, Vers.-Nr. 1)

Anlage 6: Temperatur-Zeit-Verläufe am Stahlträger,
Verbundquerschnitt 3 (aus /12/, Vers.-Nr. 2)

Anlage 7: Temperatur-Zeit-Verläufe am Stahlträger,
Verbundquerschnitt 3 (aus /12/, Vers.-Nr. 4)

Anlage 8: Temperatur-Zeit-Verläufe am Stahlträger,
Verbundquerschnitt 3 (aus /12/, Vers.-Nr. 6)

Anlage 9: Temperatur-Zeit-Verläufe am Stahlträger,
Verbundquerschnitt 4 (aus /20/, Vers.-Nr. 1)

Anlage 10: Temperatur-Zeit-Verläufe am Stahlträger,
Verbundquerschnitt 5 (aus /21/, Vers.-Nr. 7)

Anlage 11: Brandraumtemperaturen im Versuch E-300

Anlage 12: Brandraumtemperaturen im Versuch A-300

Anlage 13: Brandraumtemperaturen im Versuch M-300

Anlage 14: Temperaturentwicklung im Stahlträger,

Versuchskörper E-300: Meßquerschnitt I

Anlage 15: Temperaturentwicklung im Betonquerschnitt,
Versuchskörper E-300: Meßquerschnitt I

Anlage 16: Temperaturentwicklung an der Betonoberfläche,
Versuchskörper E-300: Meßquerschnitt I

Anlage 17: Temperaturentwicklung im Stahlträger,
Versuchskörper E-300: Meßquerschnitt II

Anlage 18: Temperaturentwicklung im Betonquerschnitt,
Versuchskörper E-300: Meßquerschnitt II

Anlage 19: Temperaturentwicklung an der Betonoberfläche,
Versuchskörper E-300: Meßquerschnitt II

Anlage 20: Temperaturentwicklung im Stahlträger,
Versuchskörper E-300: Meßquerschnitt III

Anlage 21: Temperaturentwicklung im Betonquerschnitt,
Versuchskörper E-300: Meßquerschnitt III

Anlage 22: Temperaturentwicklung an der Betonoberfläche,
Versuchskörper E-300: Meßquerschnitt III

Anlage 23: Temperaturentwicklung im Stahlträger,
Versuchskörper A-300: Meßquerschnitt I

Anlage 24: Temperaturentwicklung im Betonquerschnitt,
Versuchskörper A-300: Meßquerschnitt I

Anlage 25: Temperaturentwicklung an der Betonoberfläche,
Versuchskörper A-300, Meßquerschnitt I

Anlage 26: Temperaturentwicklung im Stahlträger,
Versuchskörper A-300, Meßquerschnitt II

Anlage 27: Temperaturentwicklung im Betonquerschnitt,

Versuchskörper A-300, Meßquerschnitt II

Anlage 28: Temperaturentwicklung an der Betonoberfläche,
Versuchskörper A-300, Meßquerschnitt II

Anlage 29: Temperaturentwicklung im Stahlträger,
Versuchskörper A-300, Meßquerschnitt III

Anlage 30: Temperaturentwicklung im Betonquerschnitt,
Versuchskörper A-300, Meßquerschnitt III

Anlage 31: Temperaturentwicklung an der Betonoberfläche,
Versuchskörper A-300, Meßquerschnitt III

Anlage 32: Temperaturentwicklung im Stahlträger,
Versuchskörper M-300, Meßquerschnitt I

Anlage 33: Temperaturentwicklung im Betonquerschnitt,
Versuchskörper M-300, Meßquerschnitt I

Anlage 34: Temperaturentwicklung an der Betonoberfläche,
Versuchskörper M-300, Meßquerschnitt I

Anlage 35: Temperaturentwicklung im Stahlträger,
Versuchskörper M-300, Meßquerschnitt II

Anlage 36: Temperaturentwicklung im Betonquerschnitt,
Versuchskörper M-300, Meßquerschnitt II

Anlage 37: Temperaturentwicklung an der Betonoberfläche,
Versuchskörper M-300, Meßquerschnitt II

Anlage 38: Temperaturentwicklung im Stahlträger,
Versuchskörper M-300, Meßquerschnitt III

Anlage 39: Temperaturentwicklung im Betonquerschnitt,
Versuchskörper M-300, Meßquerschnitt III

Anlage 40: Temperaturentwicklung an der Betonoberfläche,

Versuchskörper M-300, Meßquerschnitt III

Anlage 41: Vergleich der Temperaturentwicklung oberflächennaher Meßstellen; Versuchskörper A-300

Anlage 42: Vergleich der Temperaturentwicklung von Meßstellen am Obergurt des Stahlträgers; Versuchskörper A-300

Anlage 43: Vergleich der Temperaturentwicklung von Meßstellen am Steg des Stahlträgers bei unterschiedlicher Betondeckung; Versuchskörper A-300

Anlage 44: Vergleich der Temperaturentwicklung von Meßstellen am Untergurt des Stahlträgers; Versuchskörper A-300

Anlage 45: Vergleich der Temperaturentwicklung von Meßstellen am Steg und an der Stegverstärkung des Stahlträgers; Versuchskörper A-300

Anlage 46: Vergleich der Temperaturentwicklung von Meßstellen am Steg des Stahlträgers mit und ohne Stegverstärkung; Versuchskörper A-300

Anlage 47: Vergleich der Temperaturentwicklung oberflächennaher Meßstellen; Versuchskörper M-300

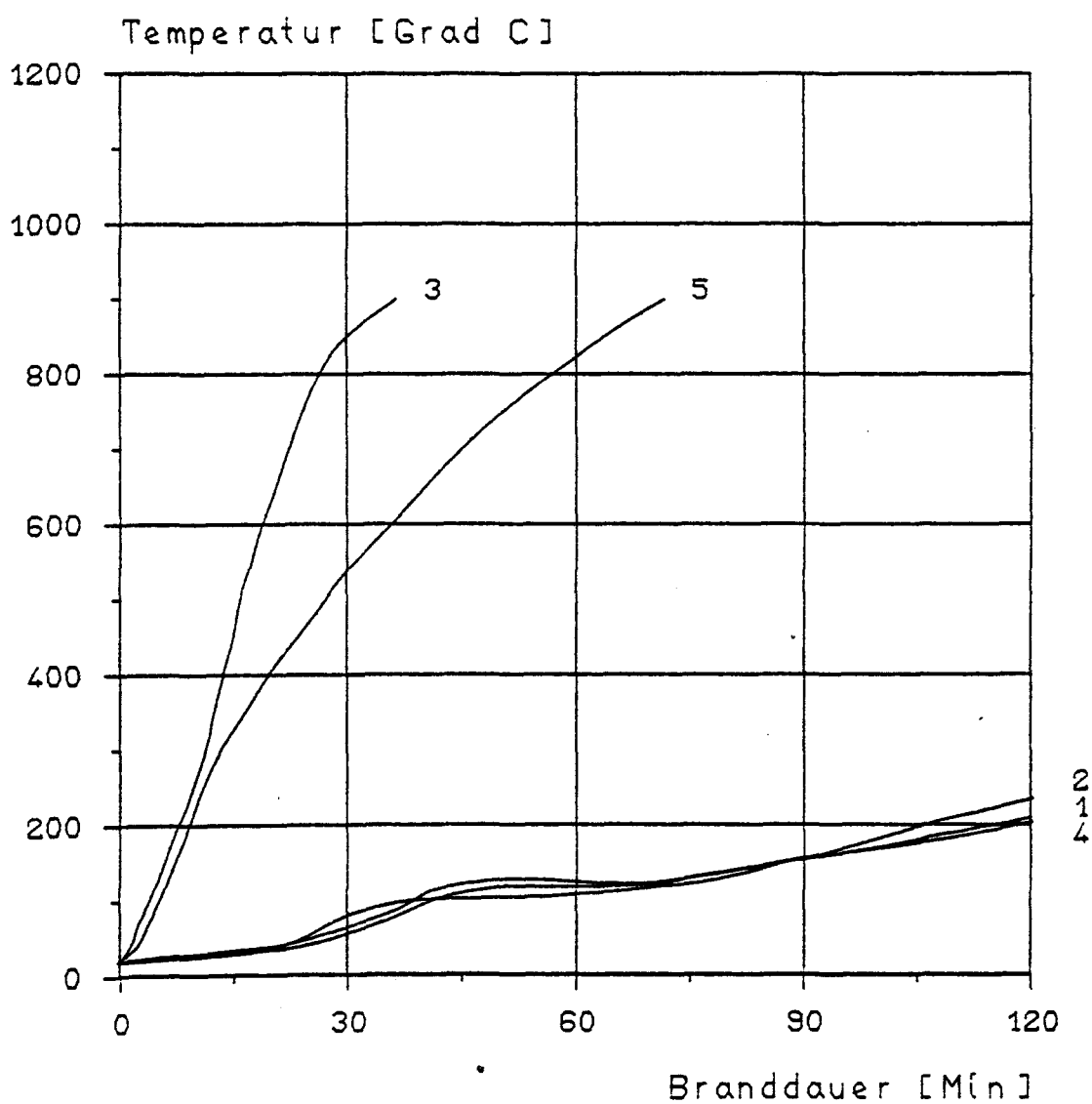
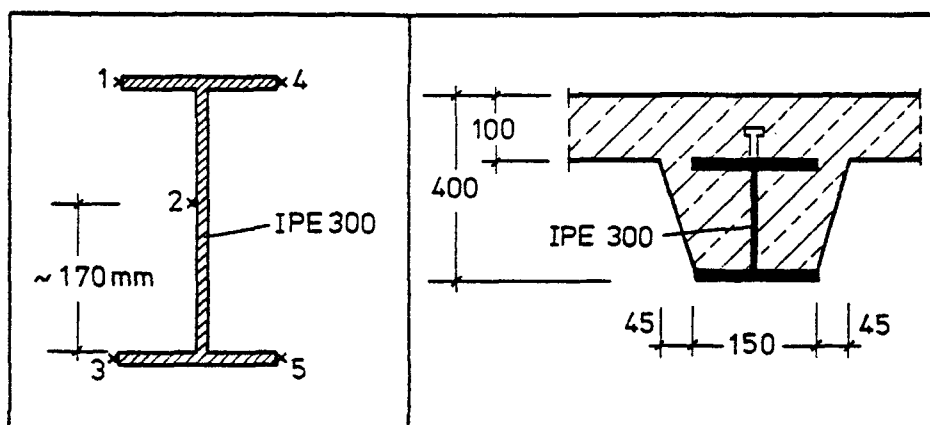
Anlage 48: Vergleich der Temperaturentwicklung von Meßstellen am Obergurt des Stahlträgers; Versuchskörper M-300

Anlage 49: Vergleich der Temperaturentwicklung von Meßstellen am Steg des Stahlträgers bei unterschiedlicher Betondeckung; Versuchskörper M-300

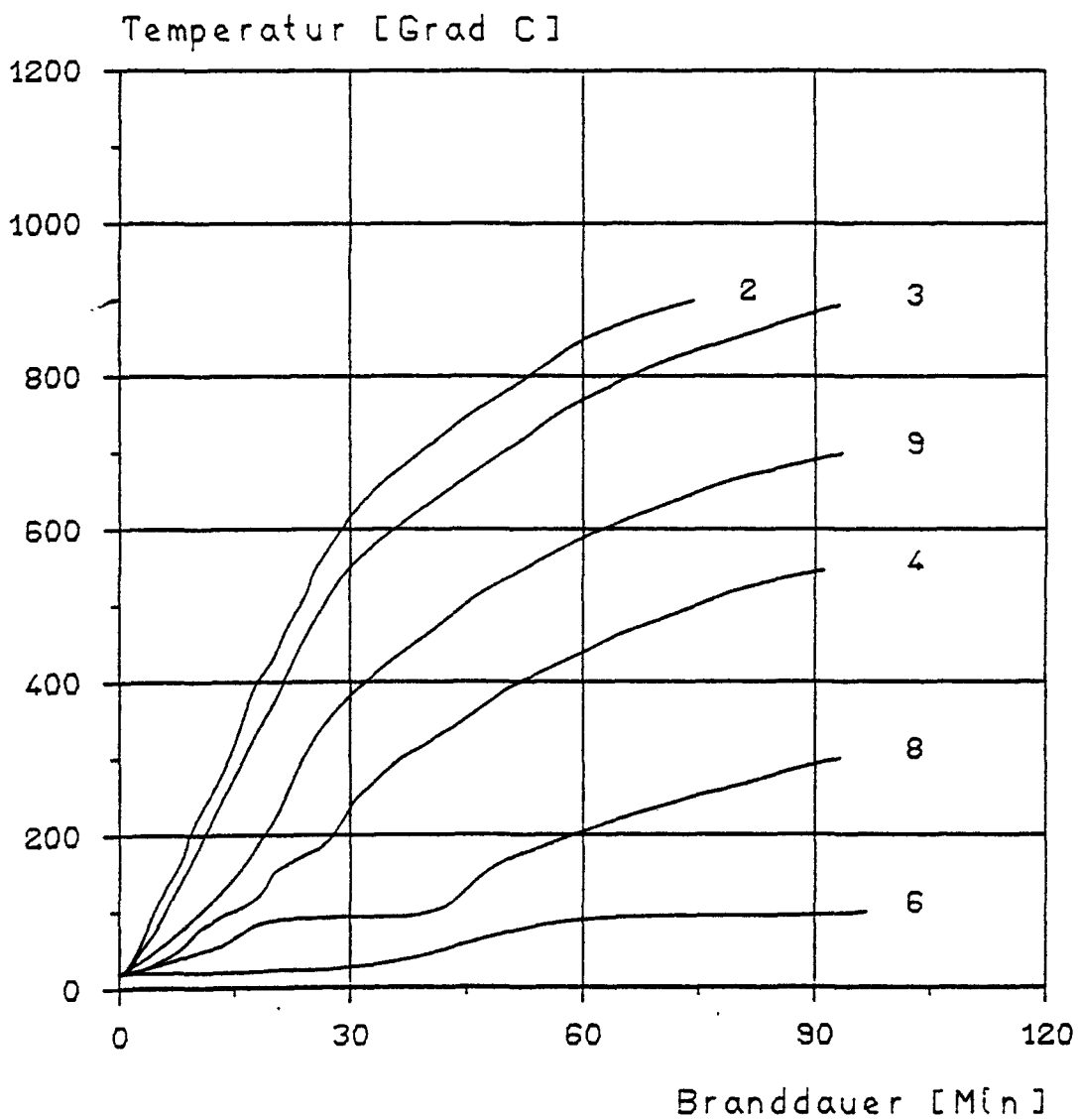
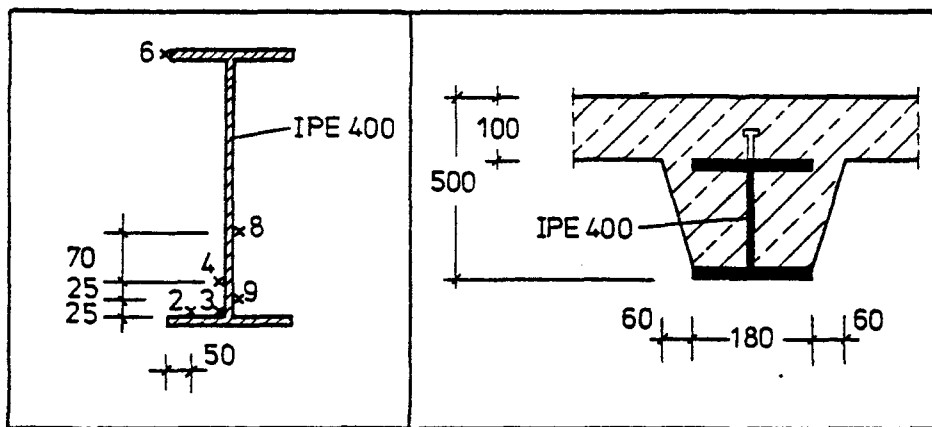
Anlage 50: Vergleich der Temperaturentwicklung von Meßstellen am Untergurt des Stahlträgers; Versuchskörper M-300

Anlage 51: Vergleich der Temperaturentwicklung von Meßstellen am Steg und an der Stegverstärkung des Stahlträgers; Versuchskörper M-300

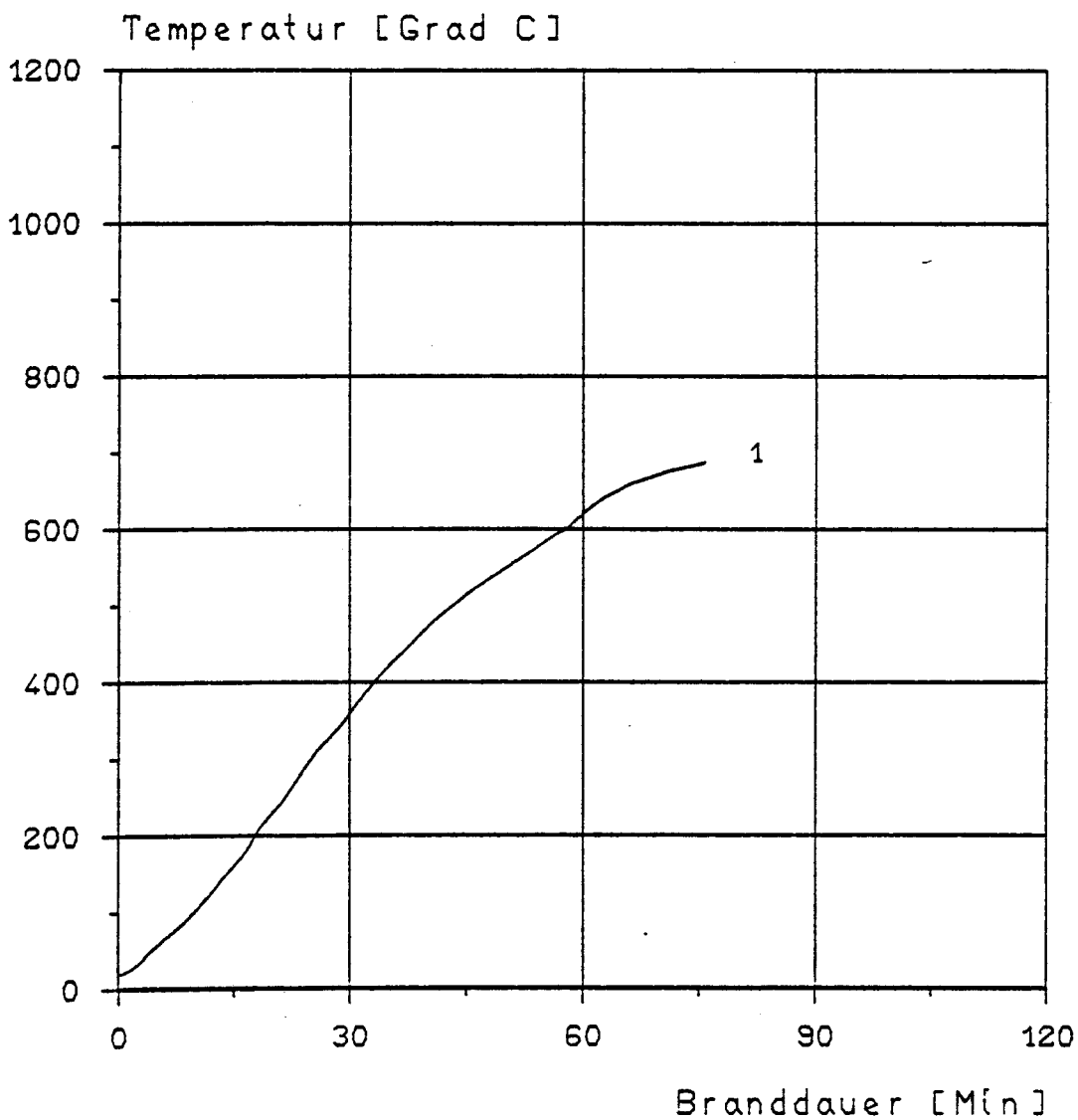
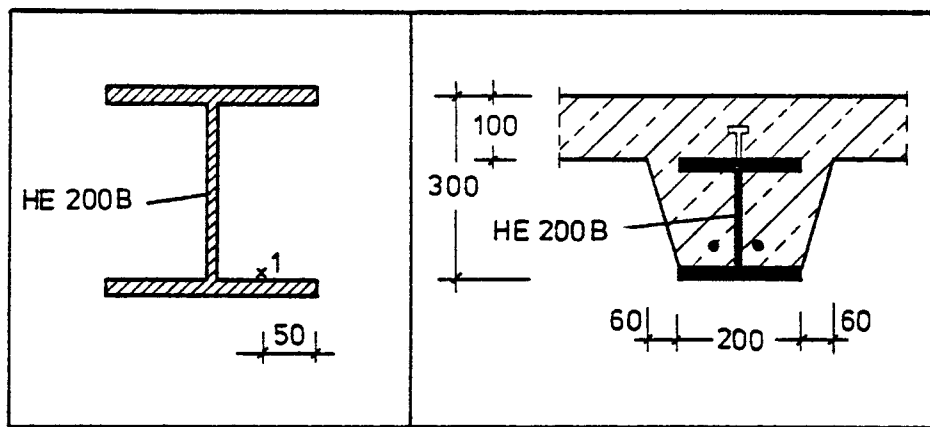
Anlage 52: Vergleich der Temperaturentwicklung von Meßstellen
am Steg des Stahlträgers mit und ohne Stegverstärkung;
Versuchskörper M-300



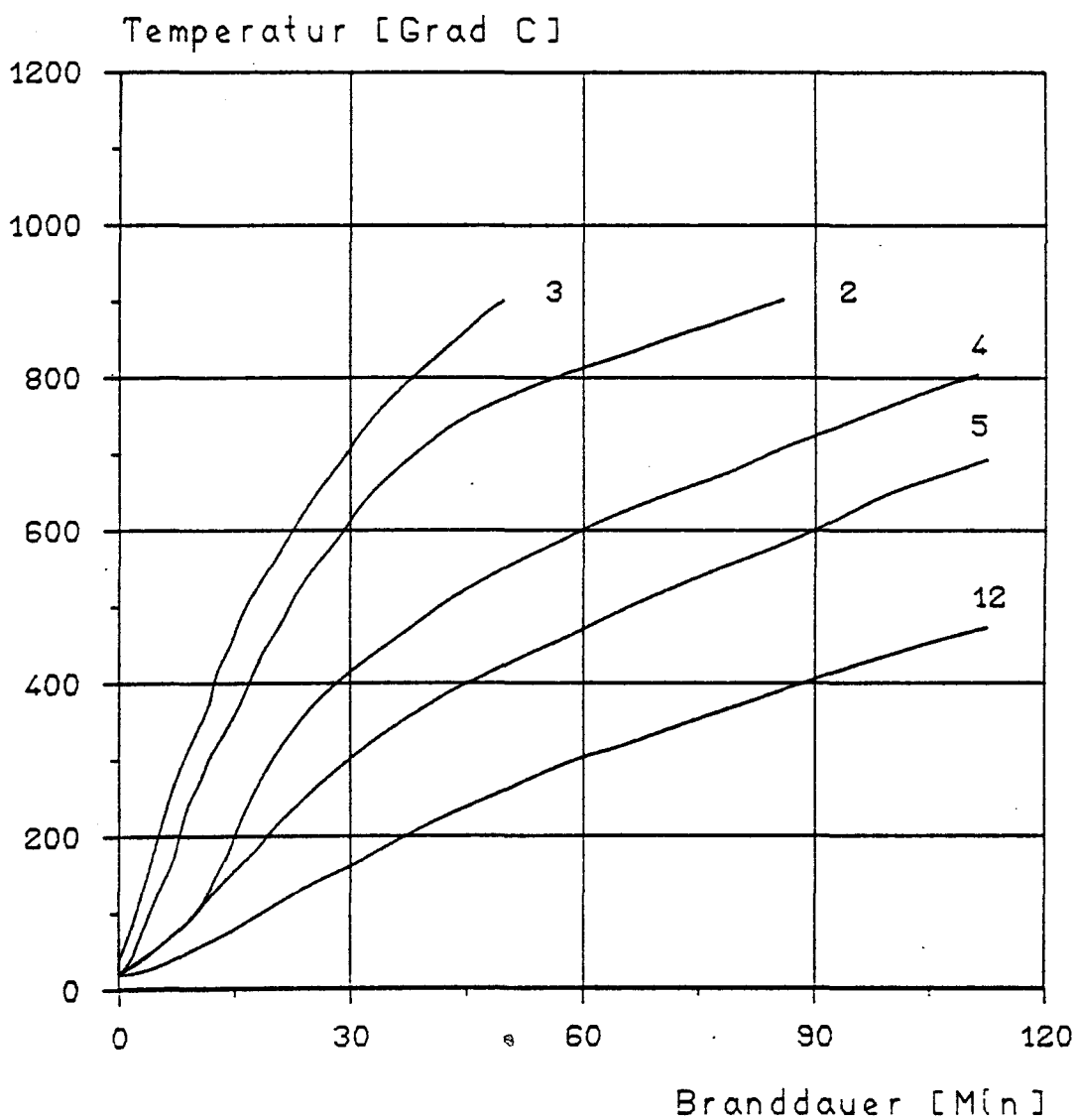
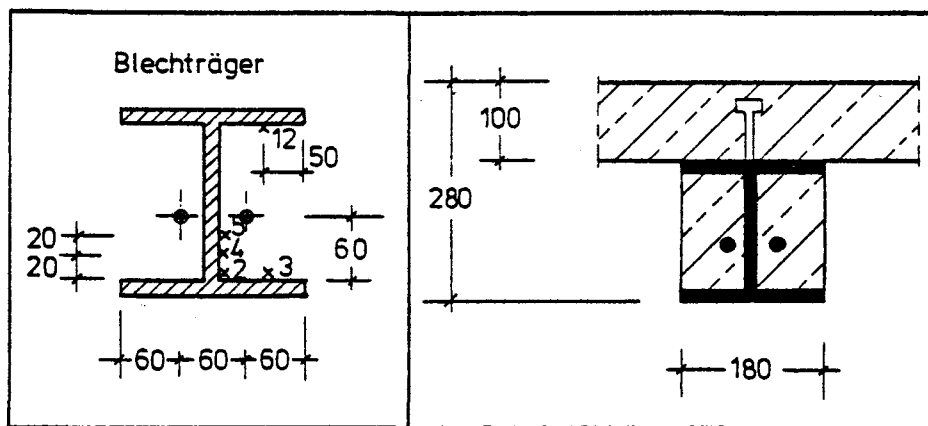
Anlage 1: Temperatur-Zeit-Verläufe am Stahlträger,
Verbundquerschnitt 1 (aus /1/, Vers.-Nr. 14)



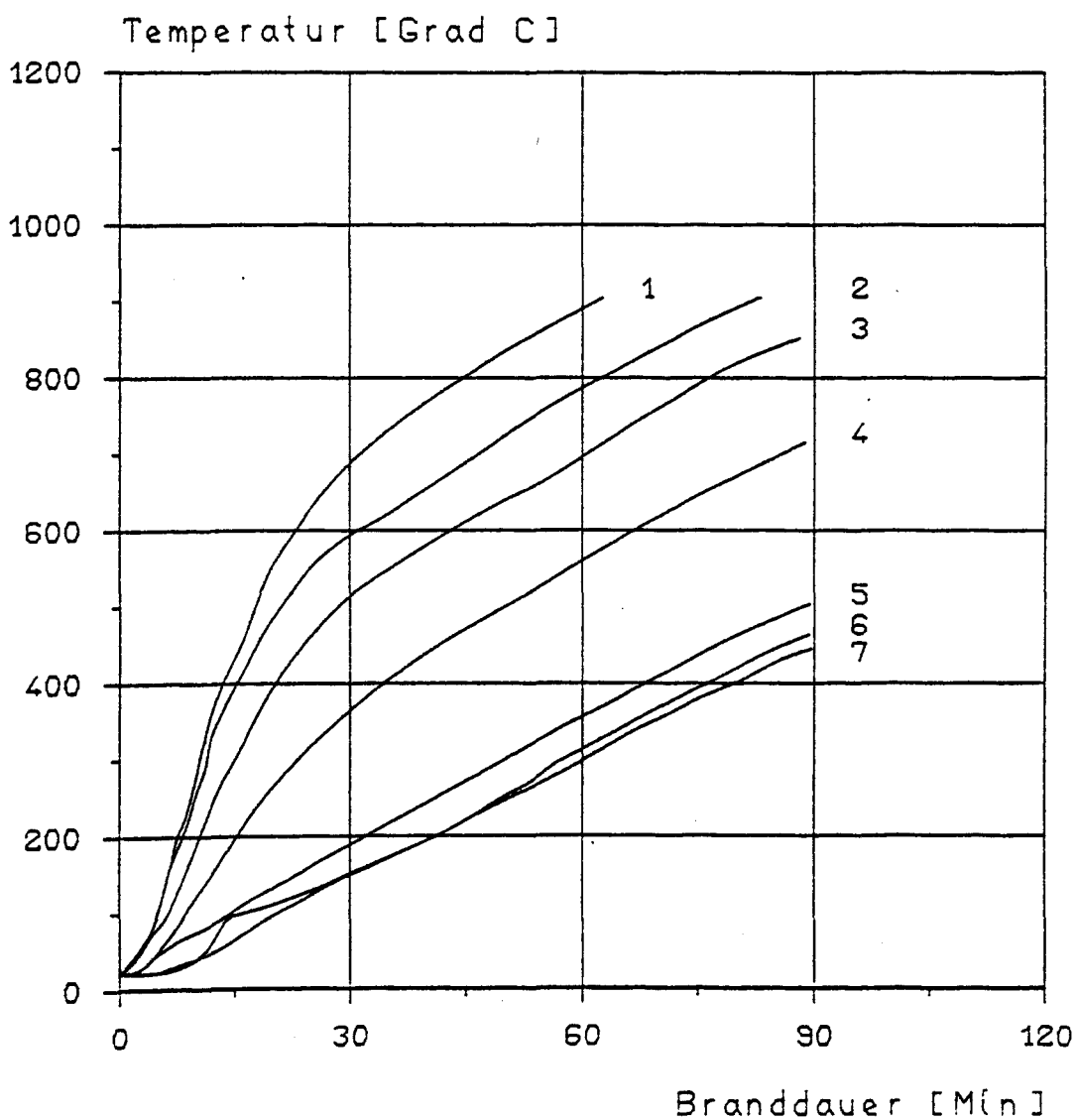
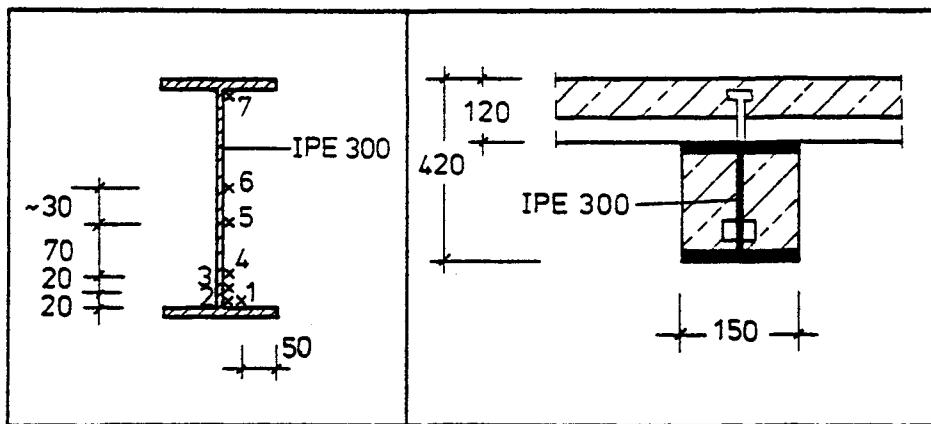
**Anlage 2: Temperatur-Zeit-Verläufe am Stahlträger,
Verbundquerschnitt 1 (aus /2/, Vers.-Nr. 13)**



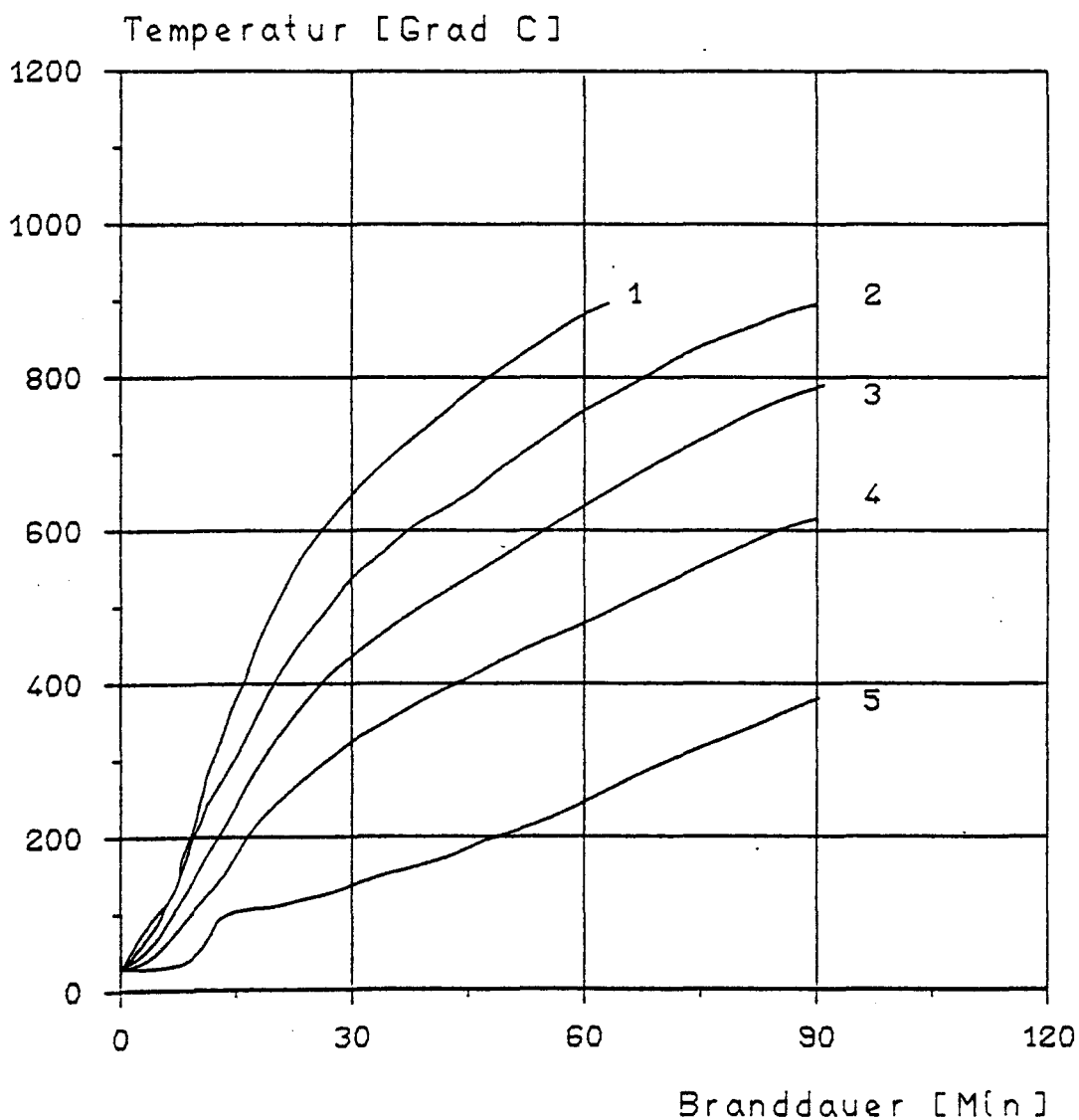
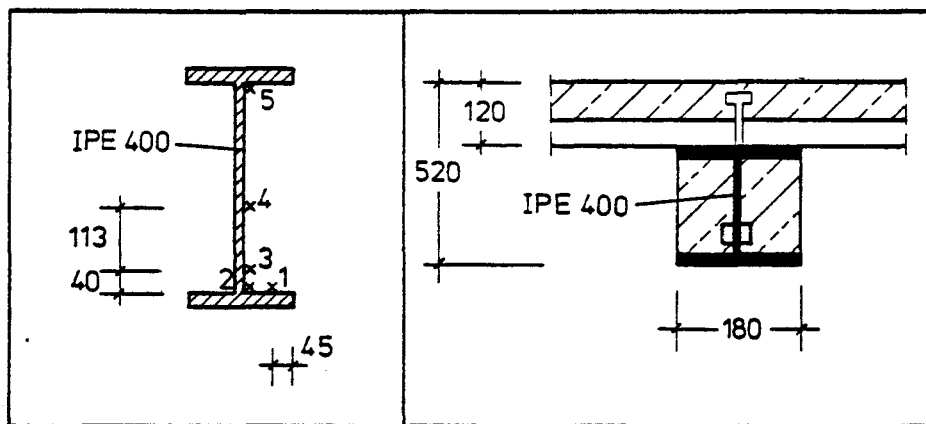
Anlage 3: Temperatur-Zeit-Verläufe am Stahlträger,
Verbundquerschnitt 1 (aus /2/, Vers.-Nr. S3)



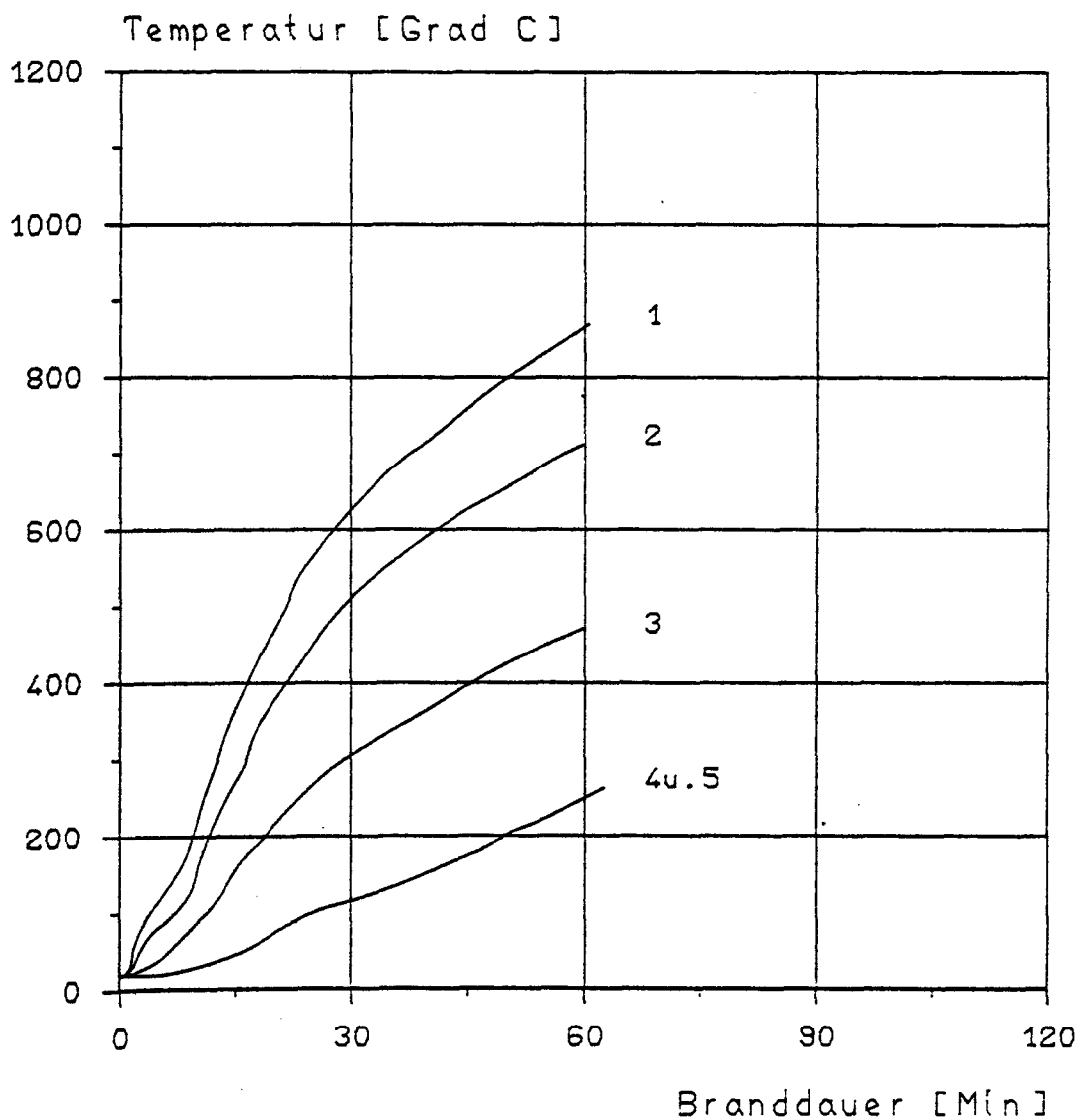
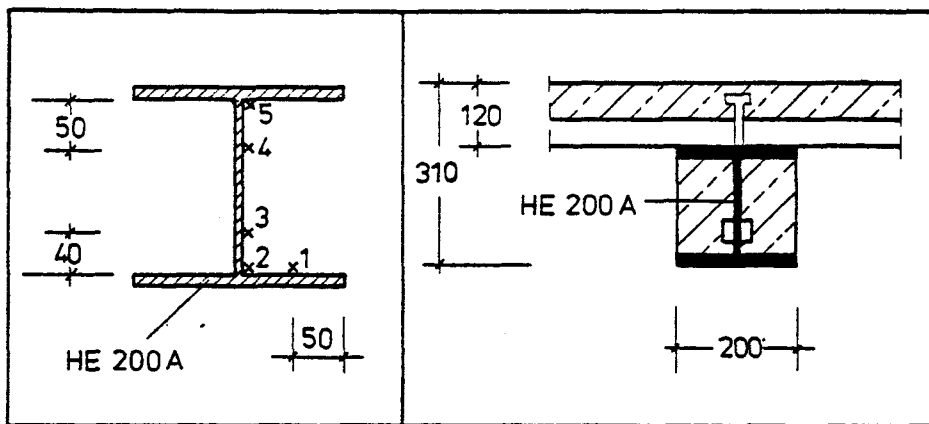
**Anlage 4: Temperatur-Zeit-Verläufe am Stahlträger,
Verbundquerschnitt 2 (aus /9/, Vers.-Nr. 1)**



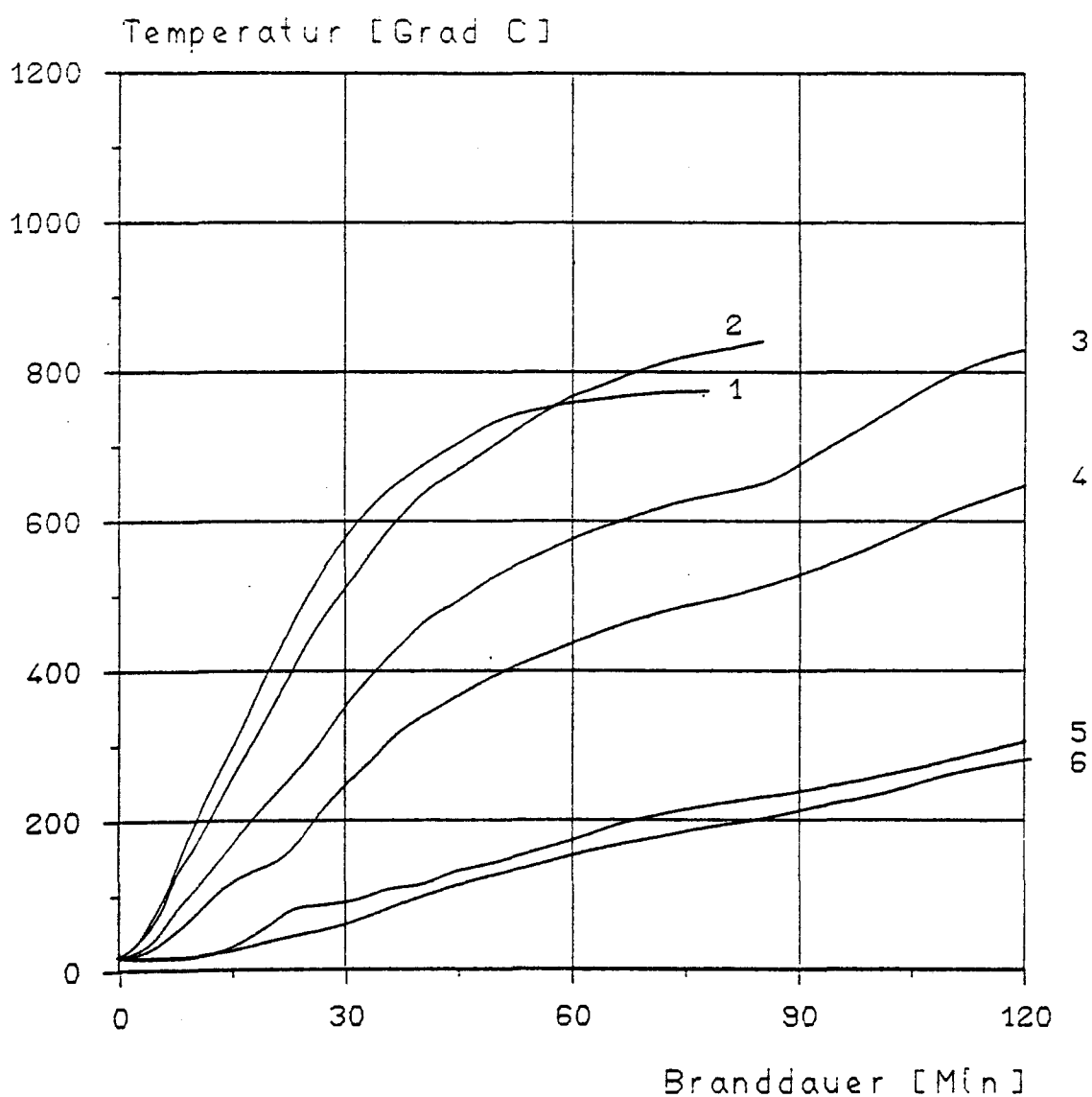
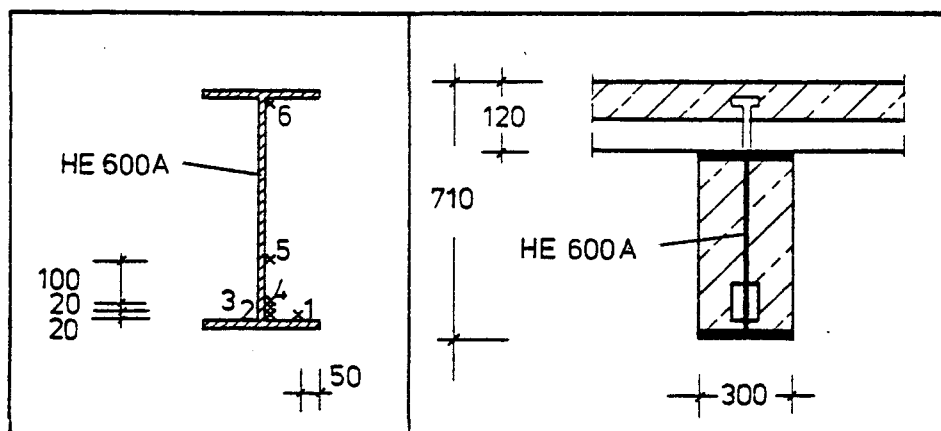
**Anlage 5: Temperatur-Zeit-Verläufe am Stahlträger,
Verbundquerschnitt 3 (aus /12/, Vers.-Nr. 1)**



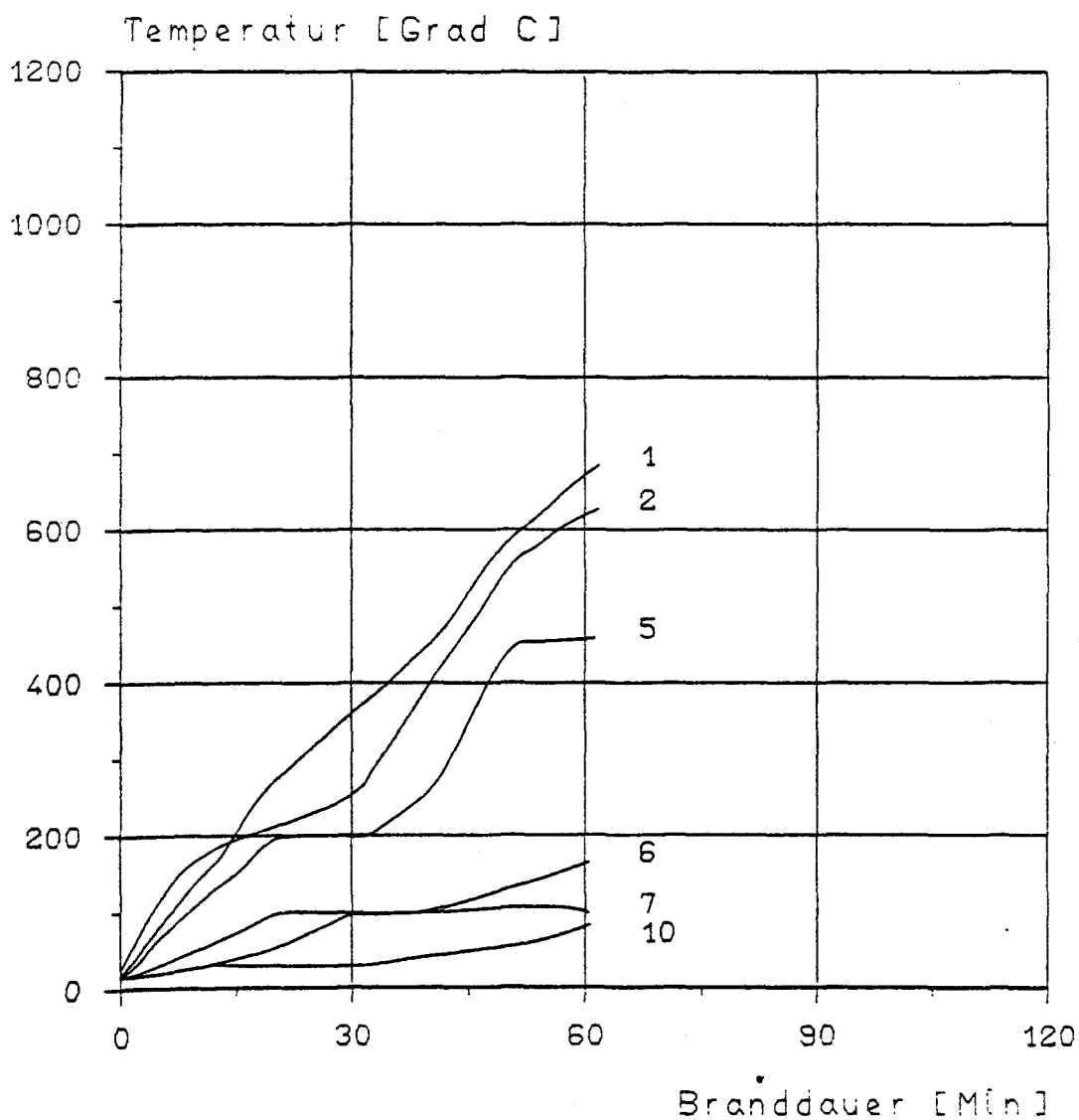
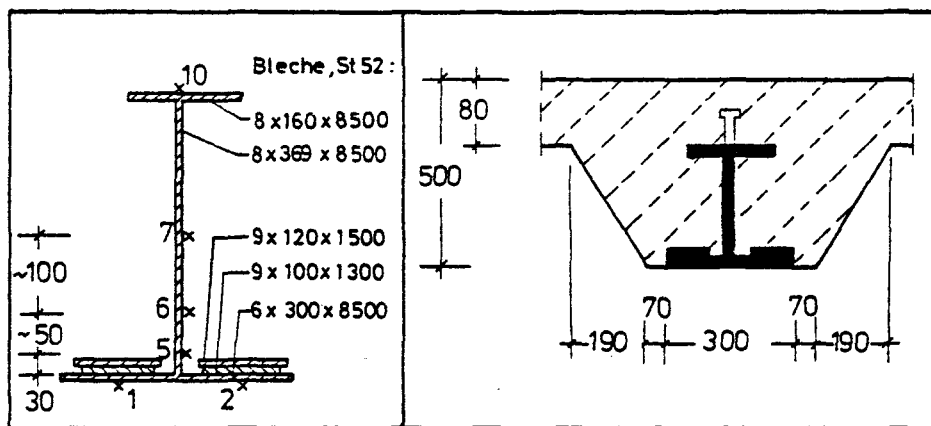
**Anlage 6: Temperatur-Zeit-Verläufe am Stahlträger,
Verbundquerschnitt 3 (aus /12/, Vers.-Nr. 2)**



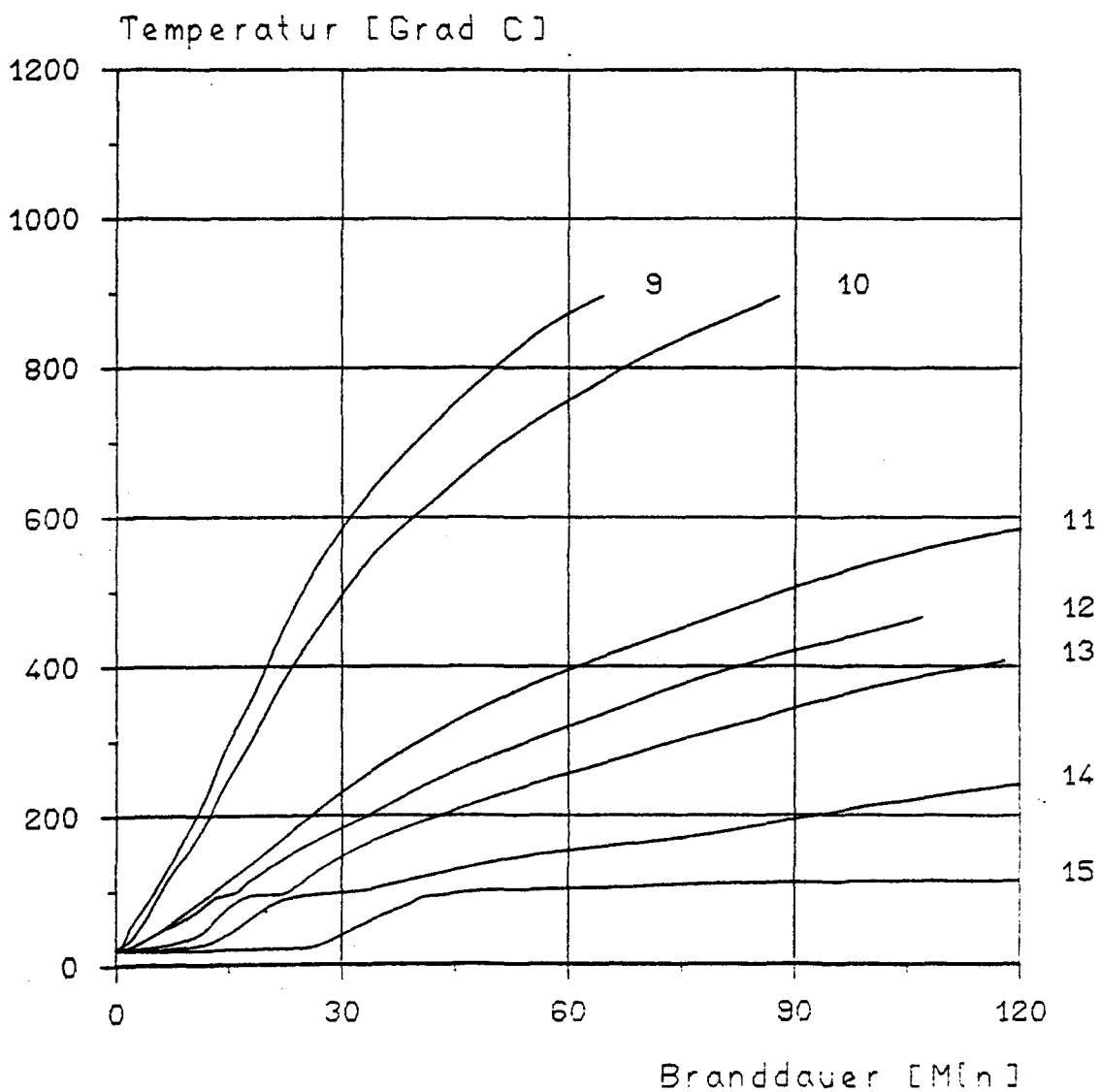
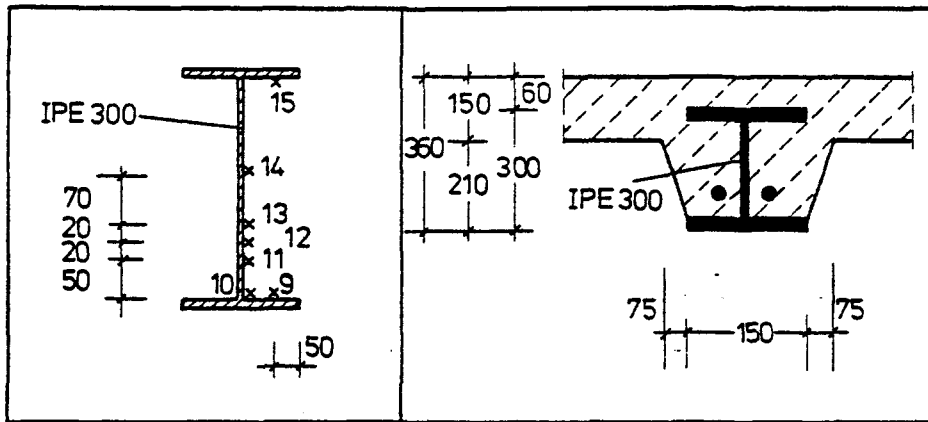
Anlage 7: Temperatur-Zeit-Verläufe am Stahlträger,
Verbundquerschnitt 3 (aus /12/, Vers.-Nr. 4)



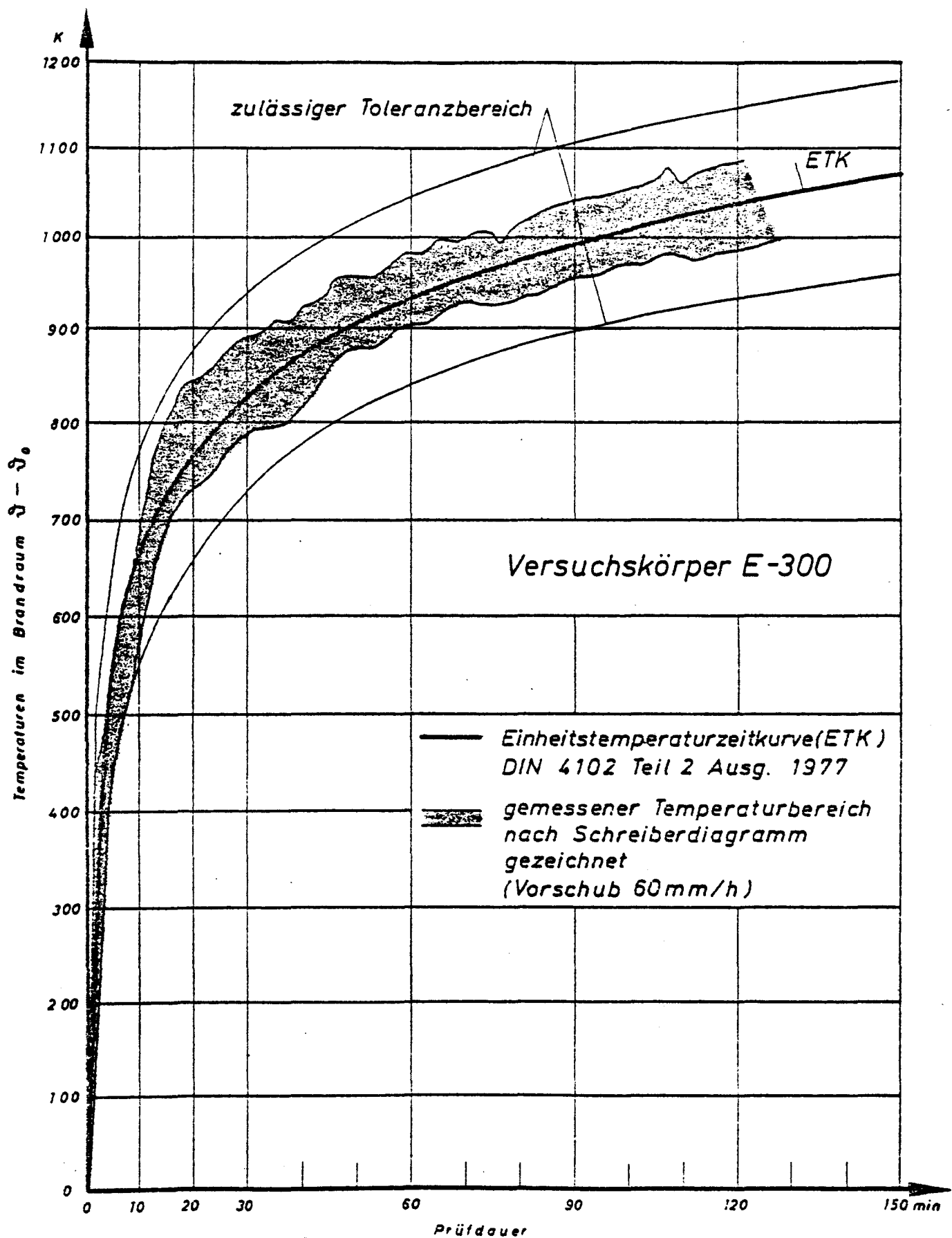
Anlage 8: Temperatur-Zeit-Verläufe am Stahlträger,
Verbundquerschnitt 3 (aus /12/, Vers.-Nr. 6)



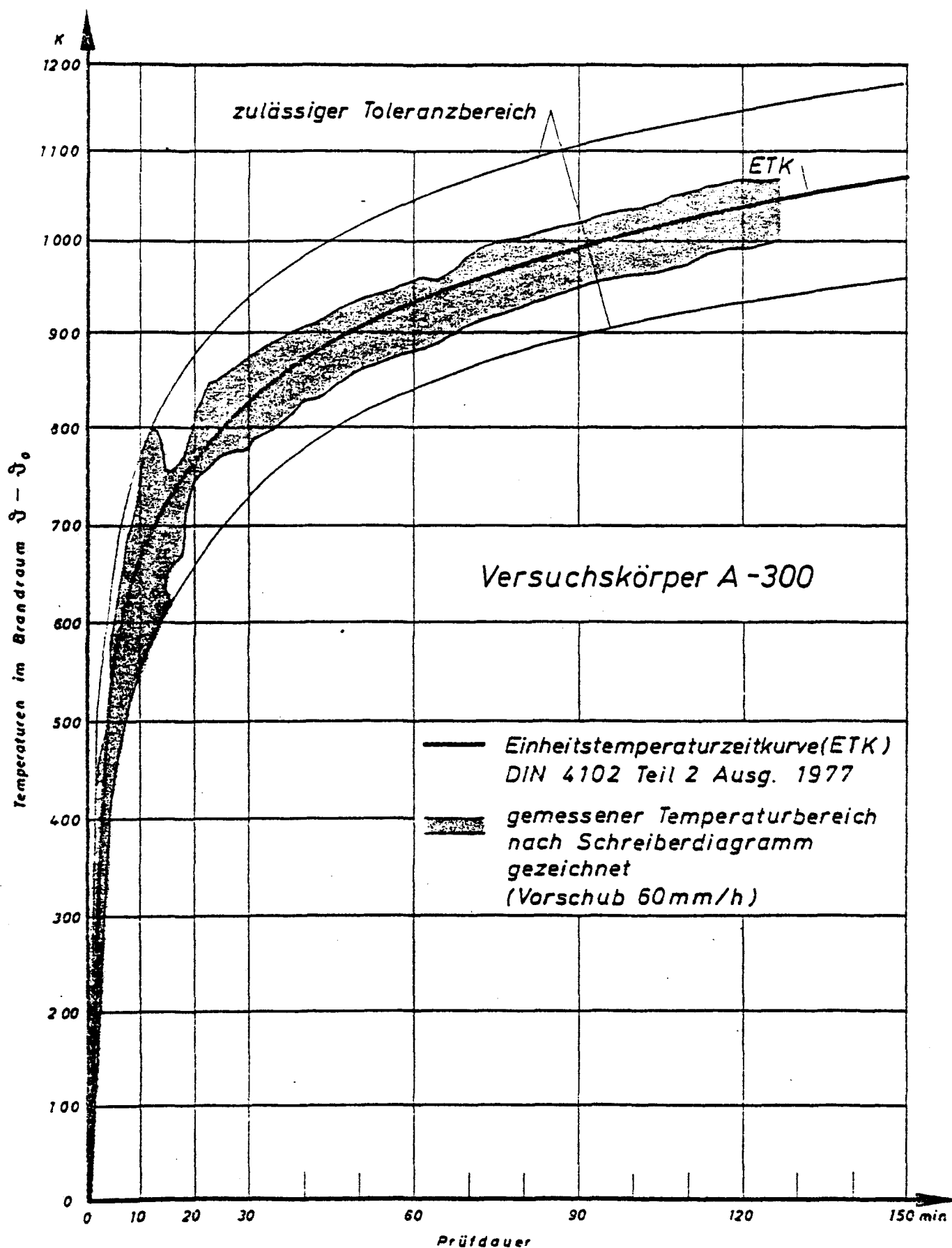
**Anlage 9: Temperatur-Zeit-Verläufe am Stahlträger,
Verbundquerschnitt 4 (aus /20/, Vers.-Nr. 1)**



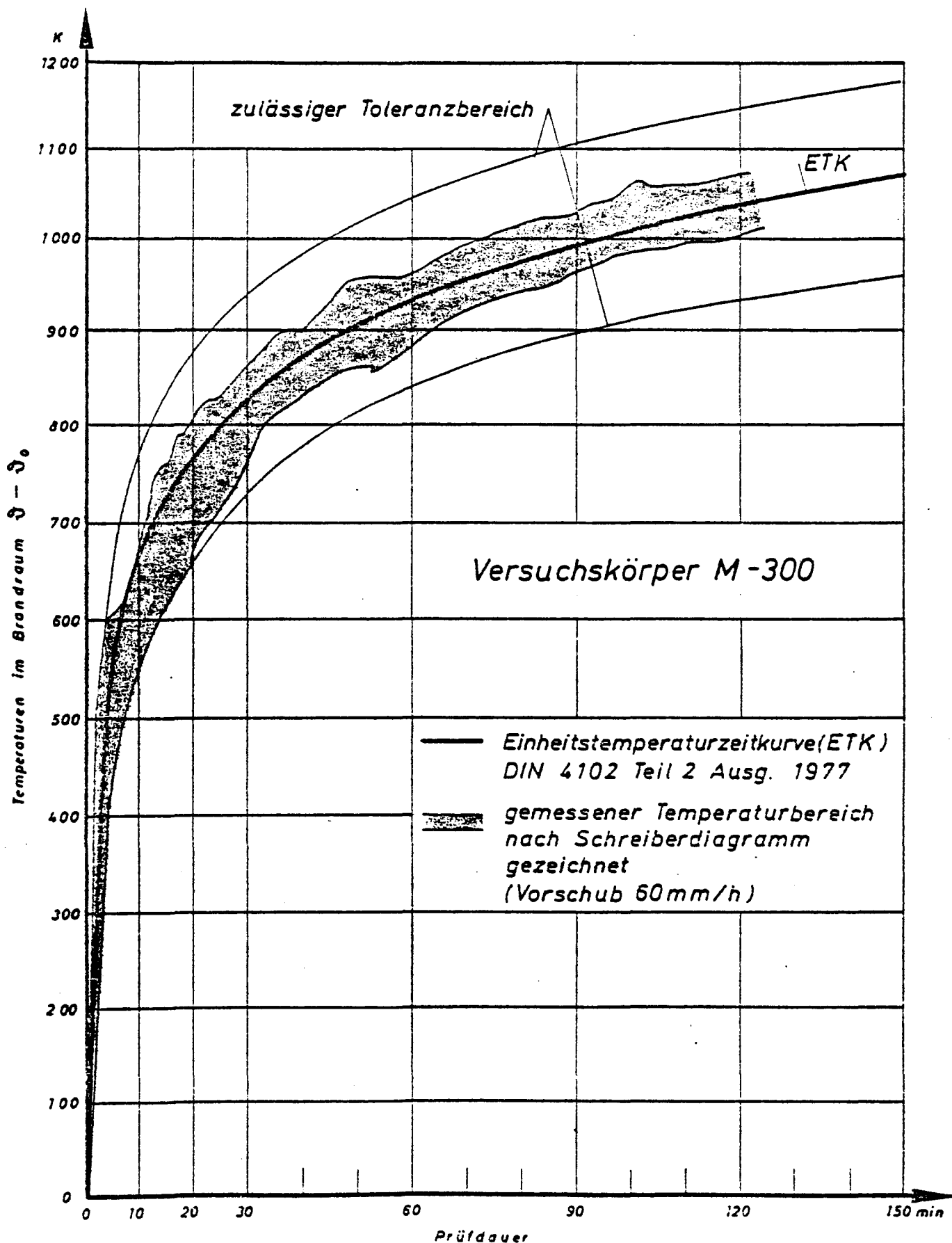
**Anlage 10: Temperatur-Zeit-Verläufe am Stahlträger,
Verbundquerschnitt 5 (aus /21/, Vers.-Nr. 7)**



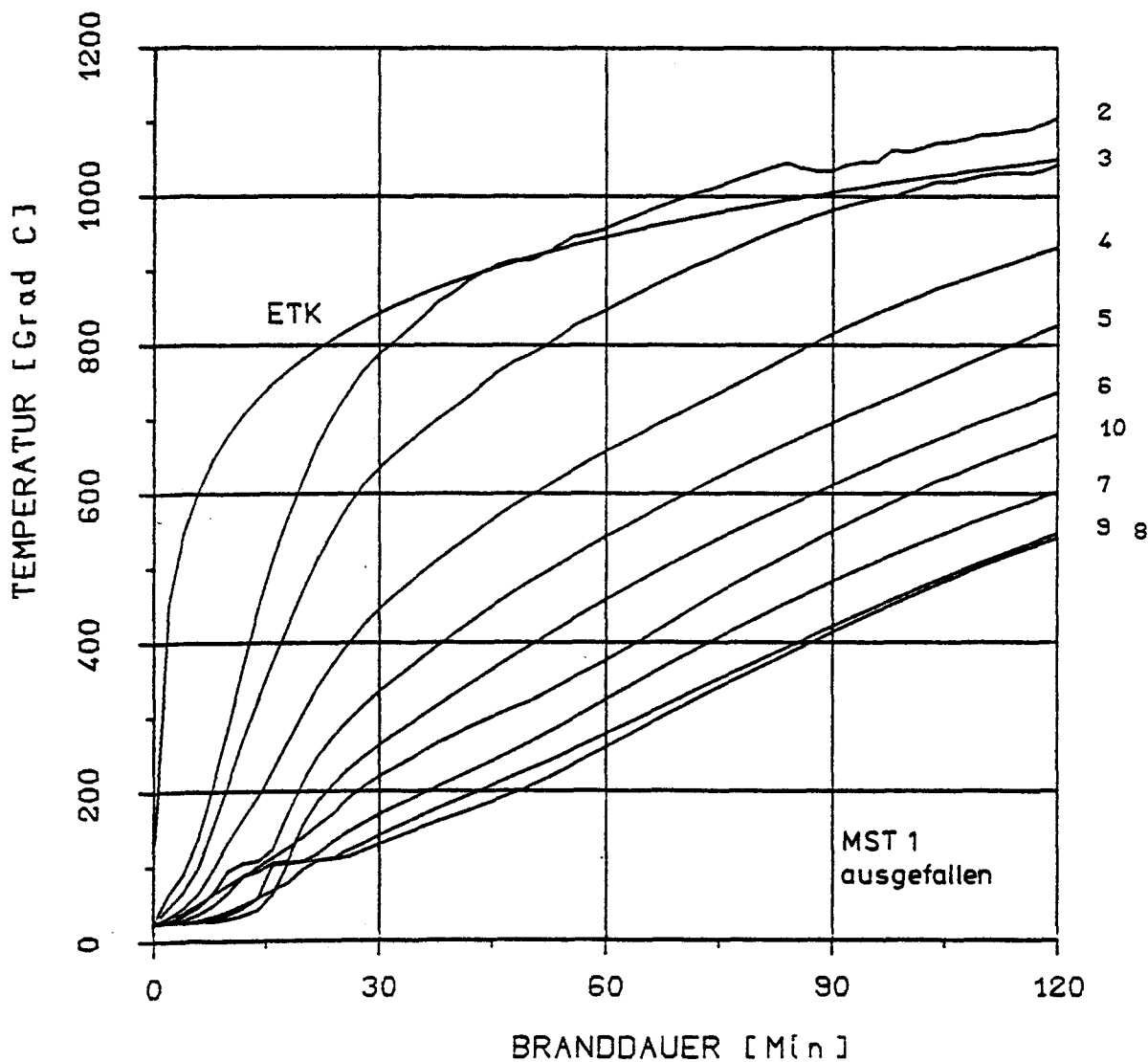
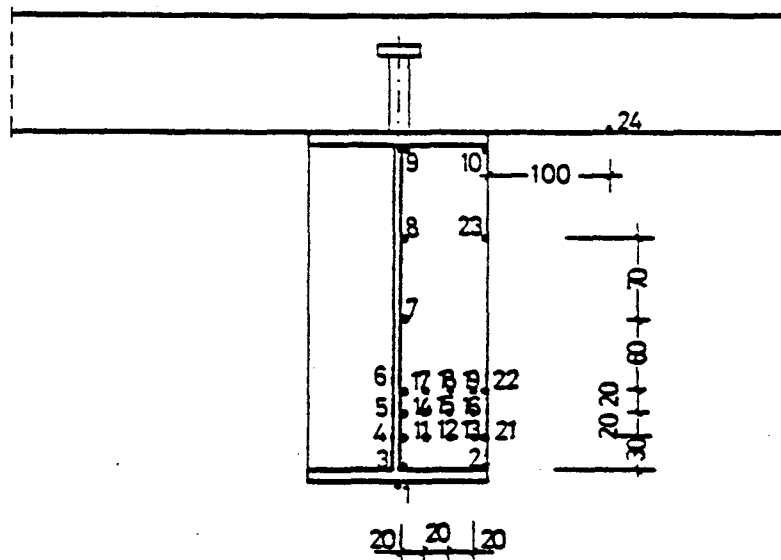
Anlage 11: Brandraumtemperaturen im Versuch E-300



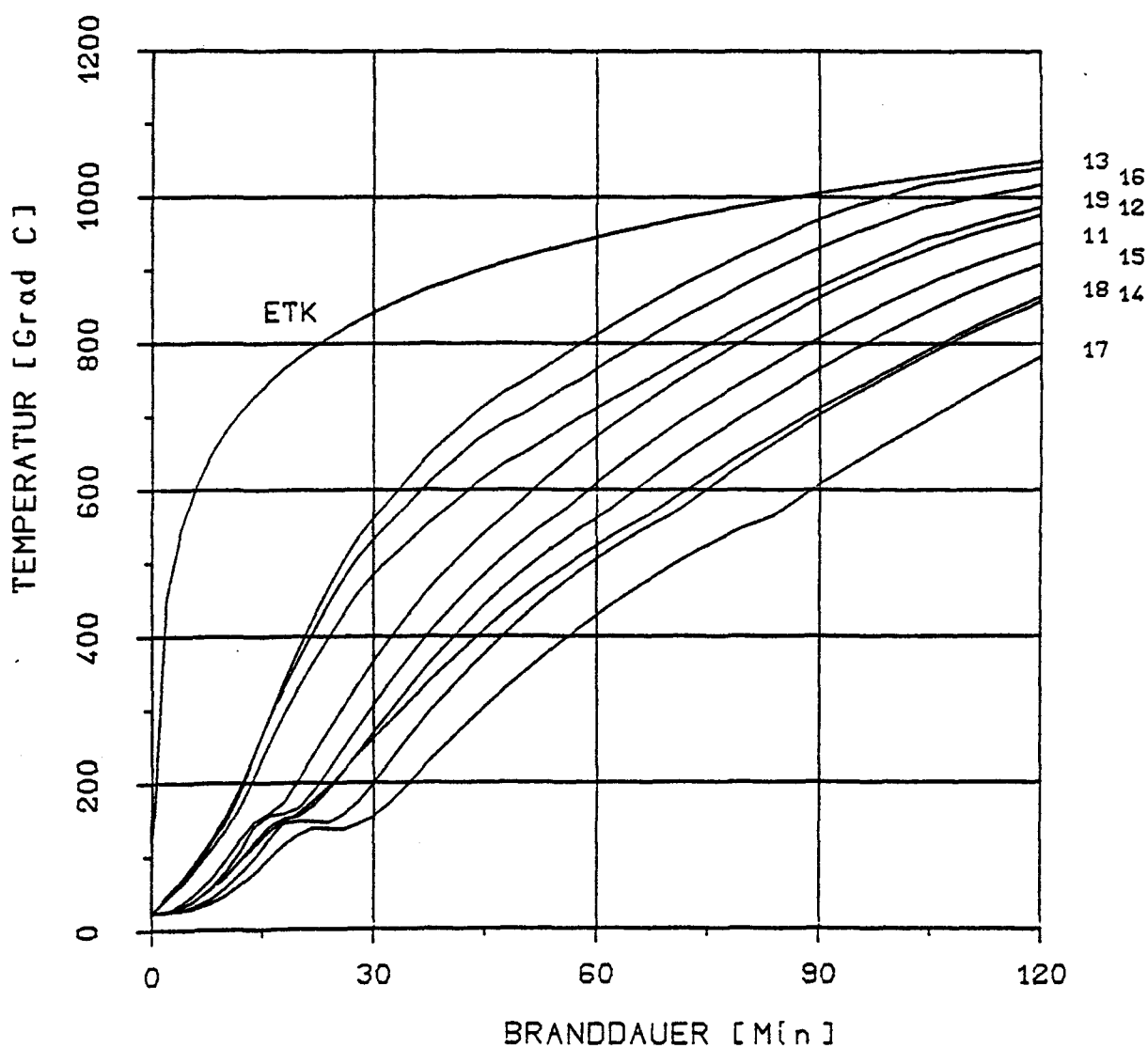
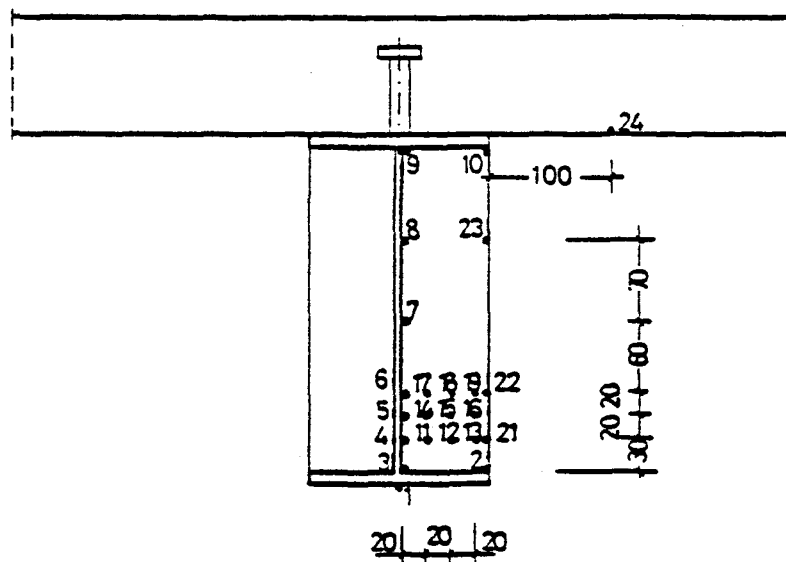
Anlage 12: Brandraumtemperaturen im Versuch A-300



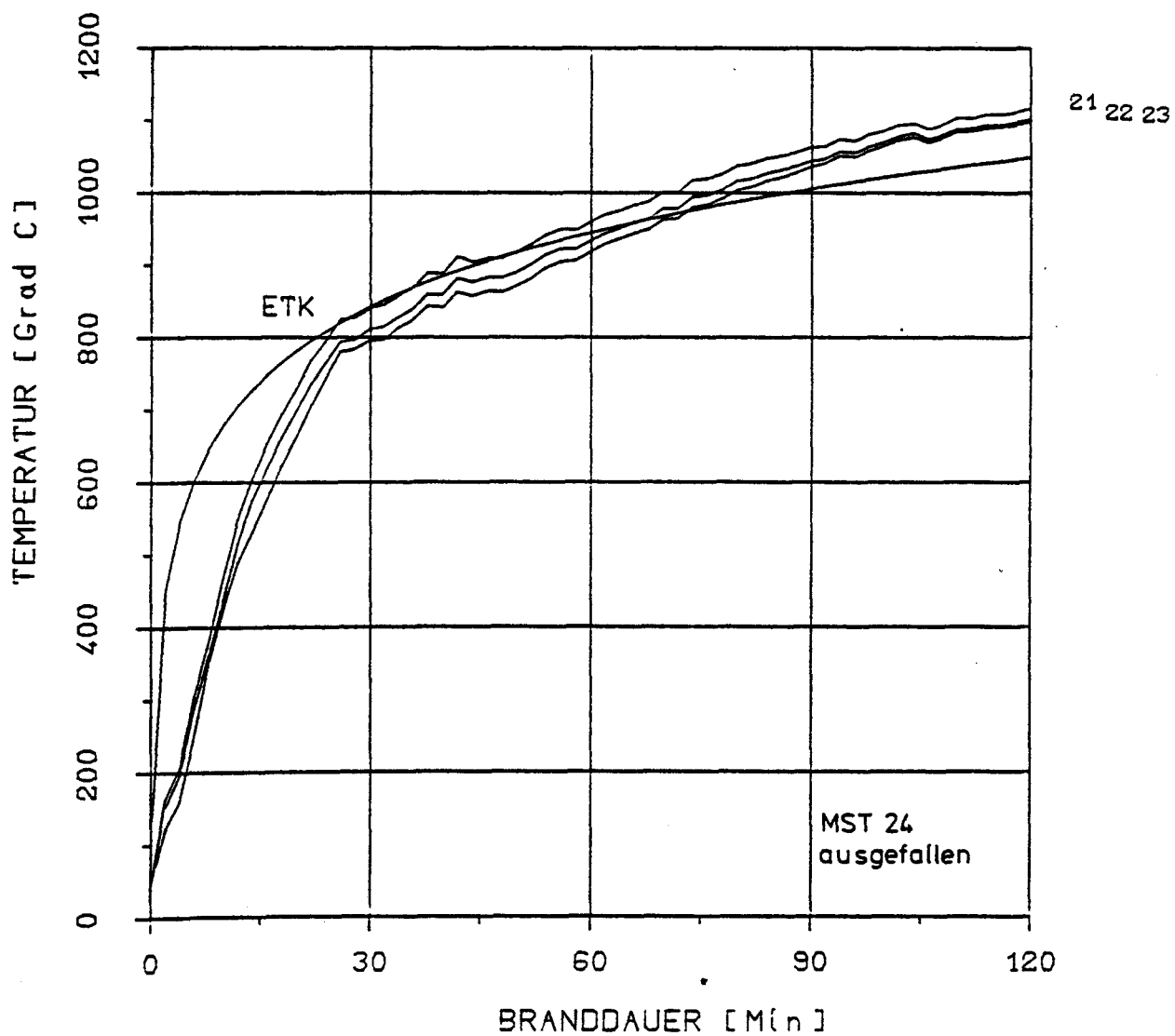
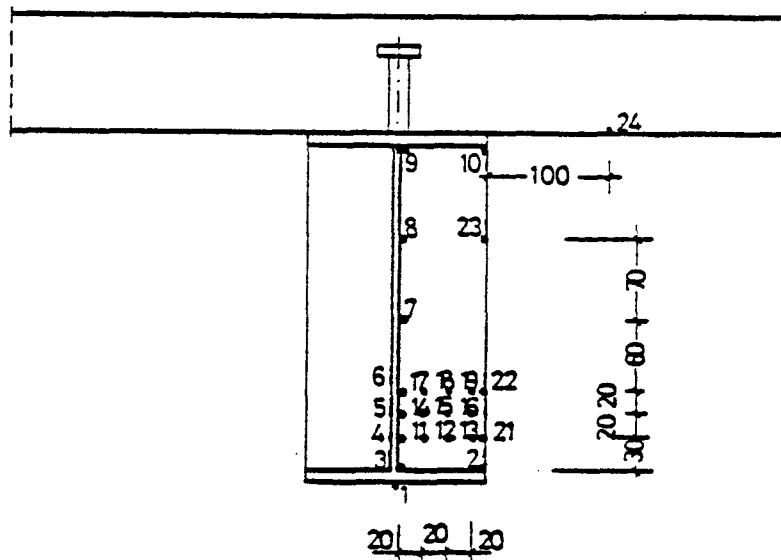
Anlage 13: Brandraumtemperaturen im Versuch M-300



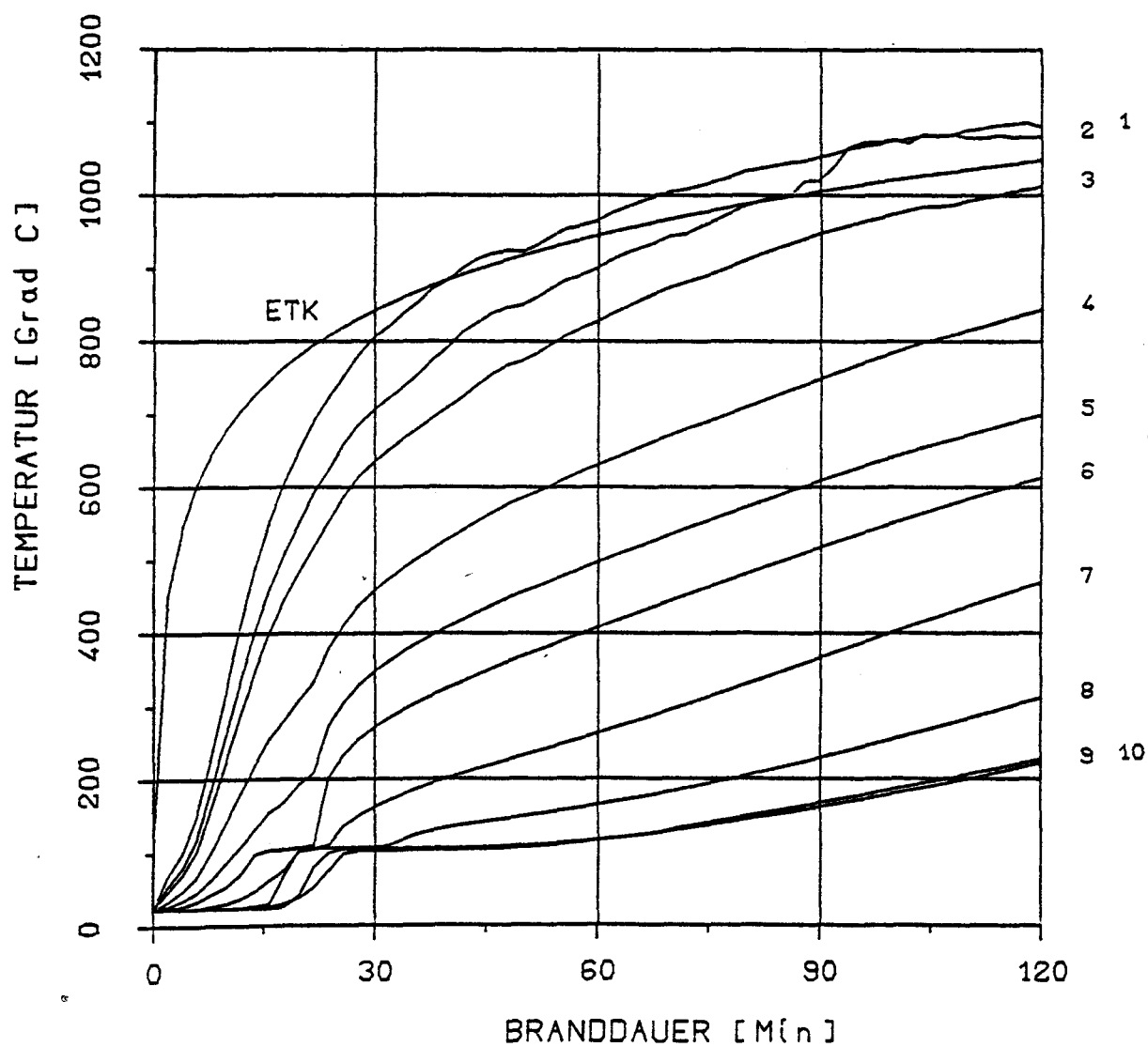
Anlage 14: Temperaturentwicklung im Stahlträger,
Versuchskörper E-300: Meßquerschnitt I



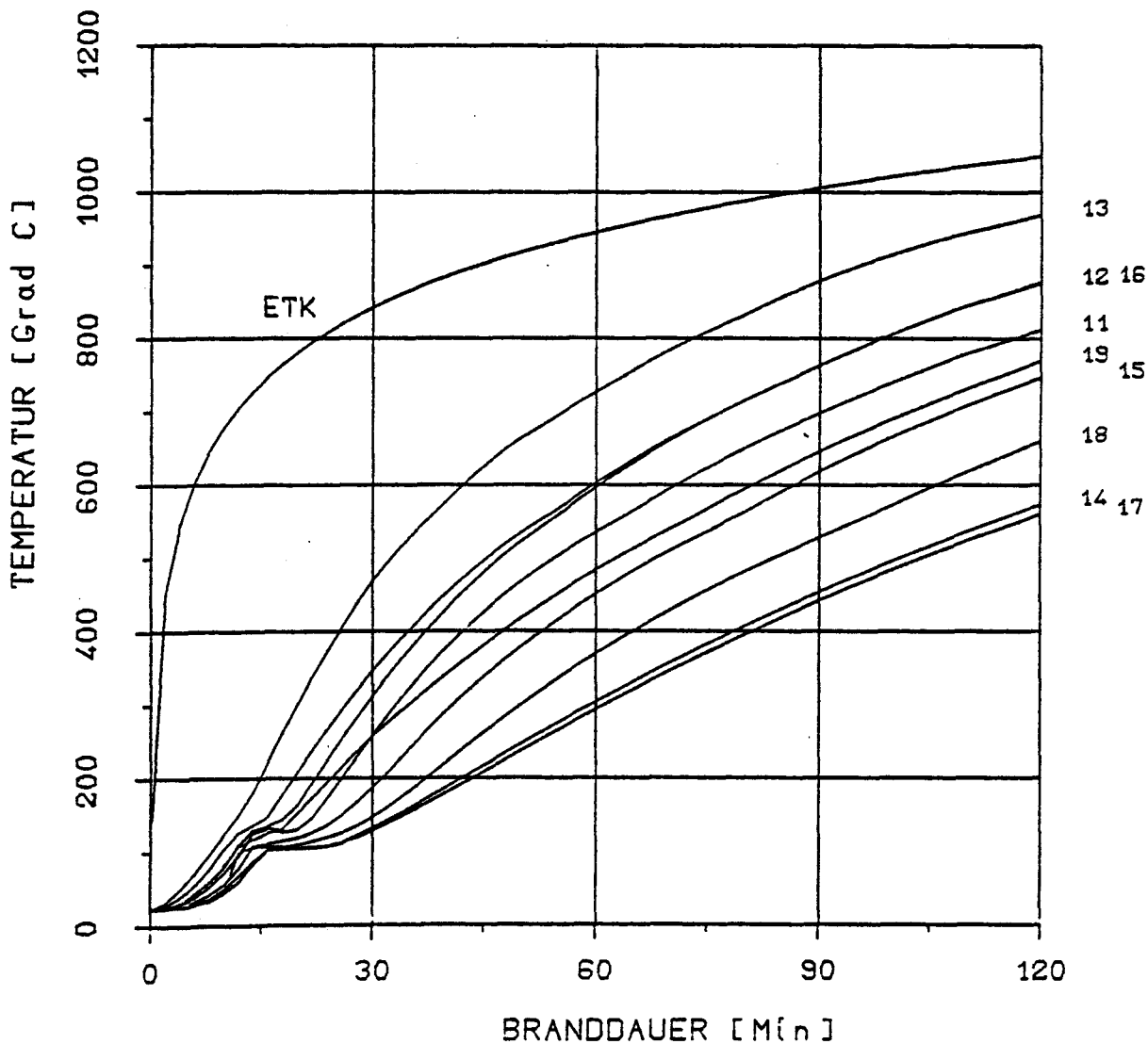
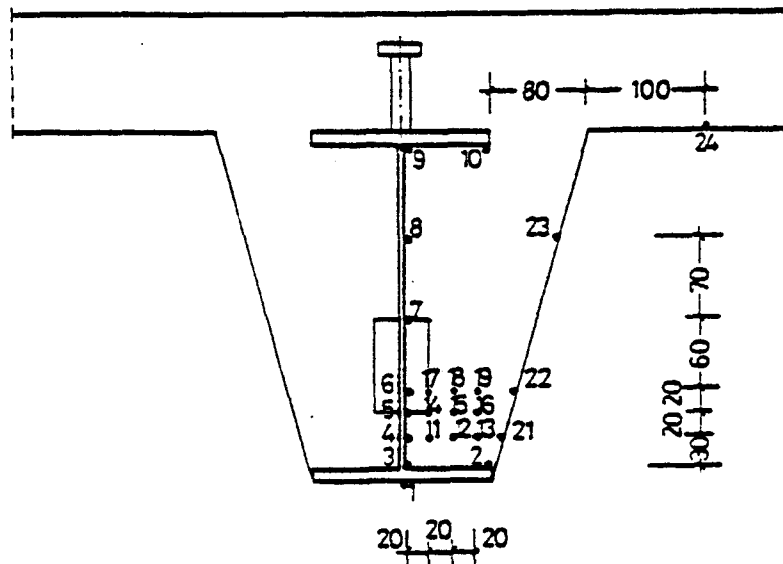
Anlage 15: Temperaturentwicklung im Betonquerschnitt,
Versuchskörper E-300: Meßquerschnitt I



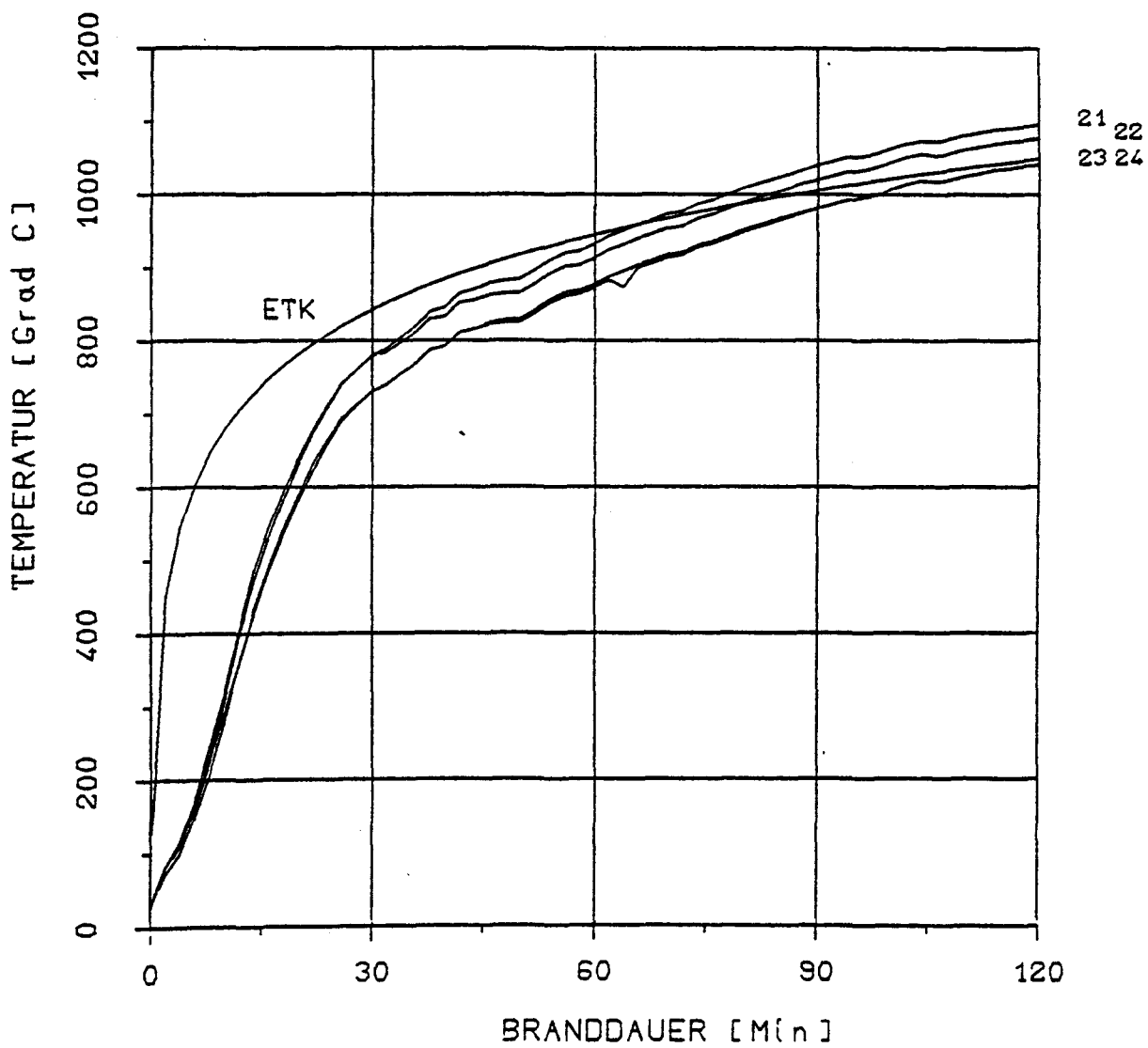
Anlage 16: Temperaturentwicklung an der Betonoberfläche,
Versuchskörper E-300: Meßquerschnitt I

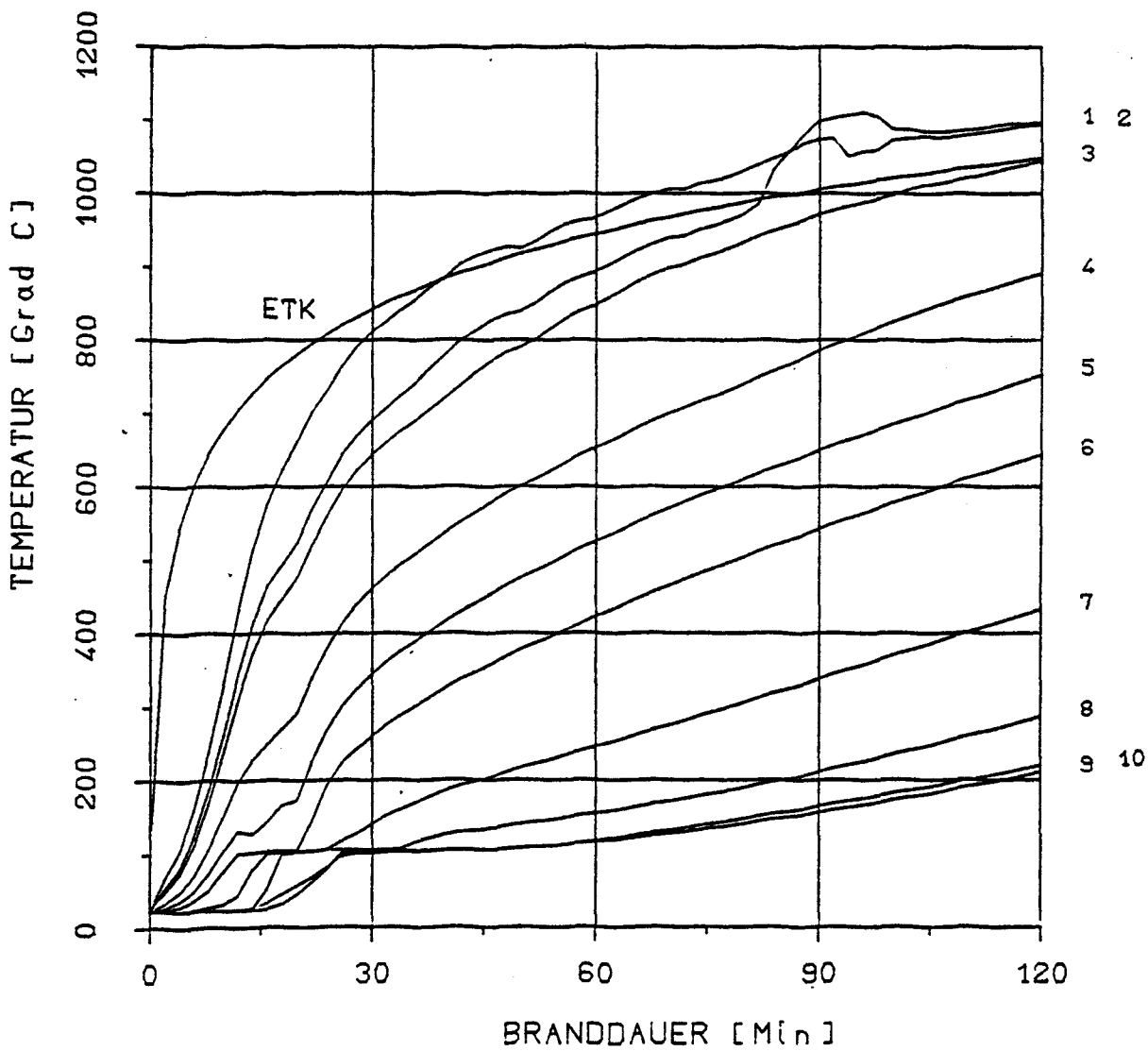
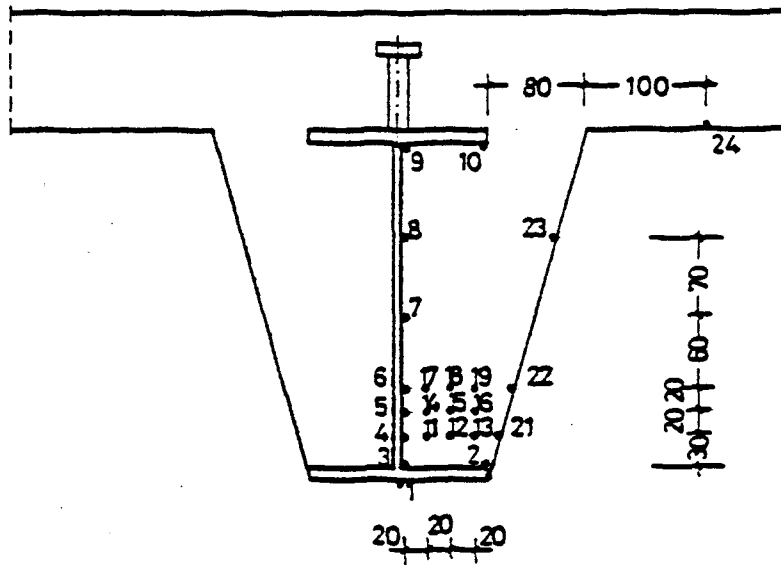


16/01/2015

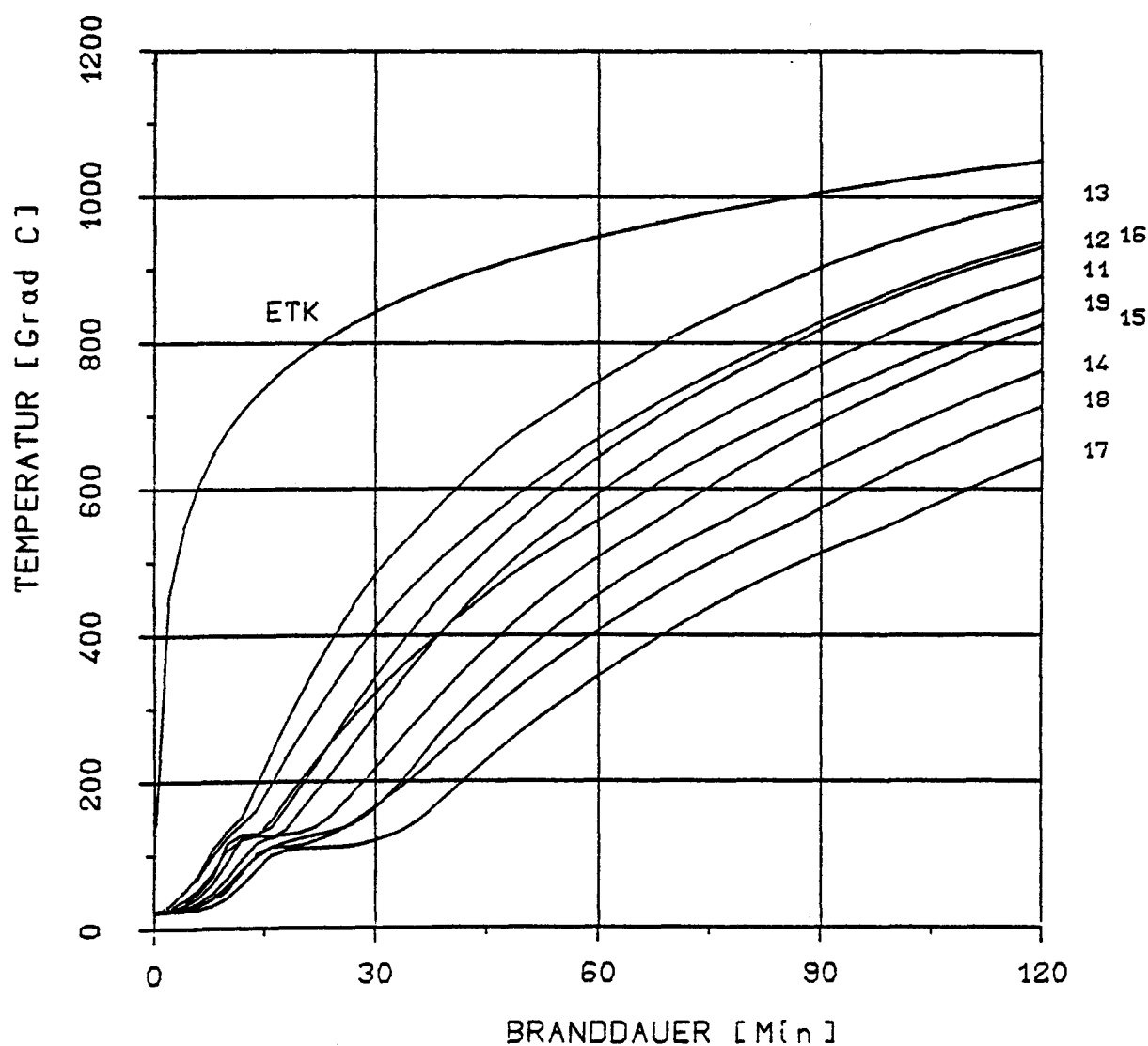
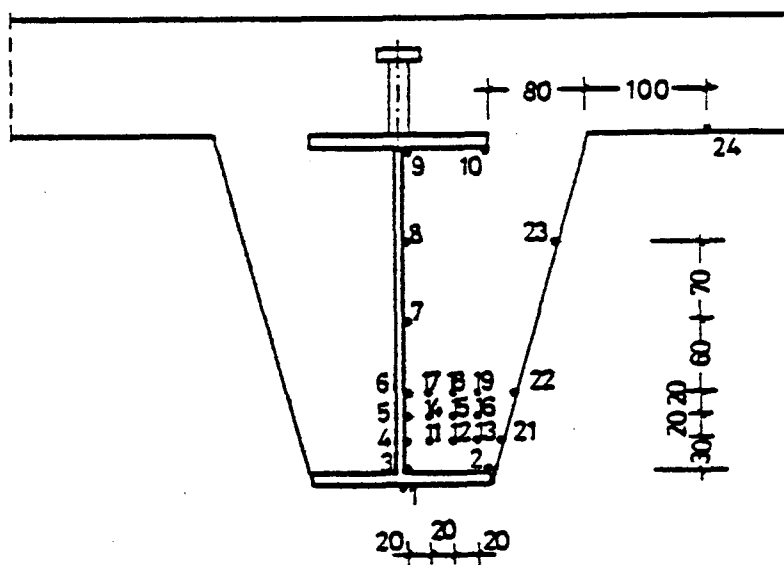


**Anlage 18: Temperaturentwicklung im Betonquerschnitt,
Versuchskörper E-300: Meßquerschnitt II**

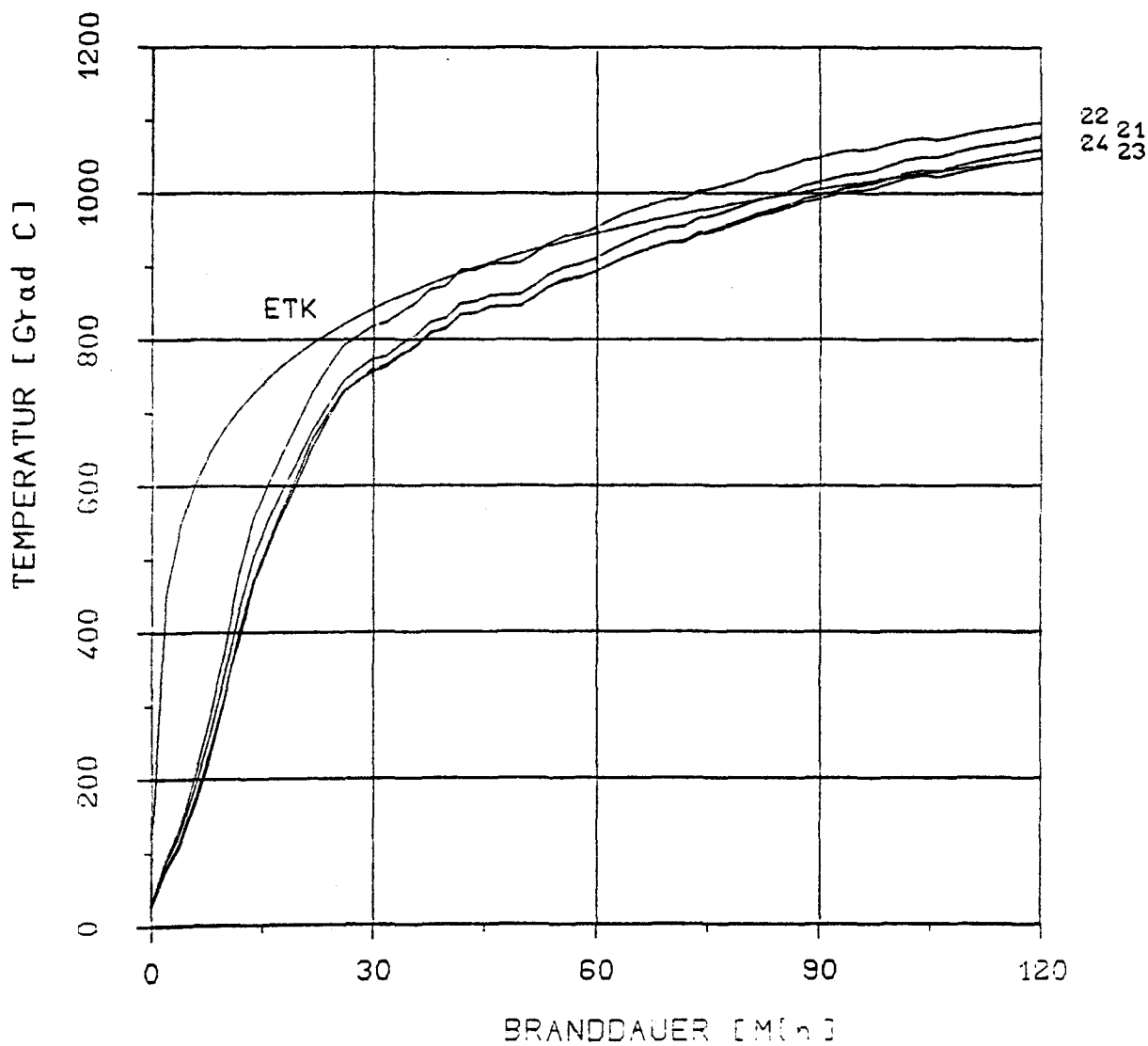
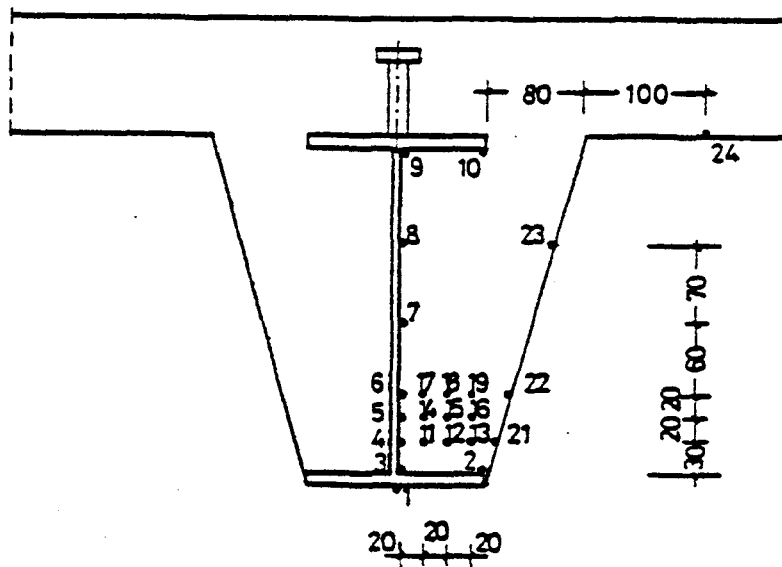




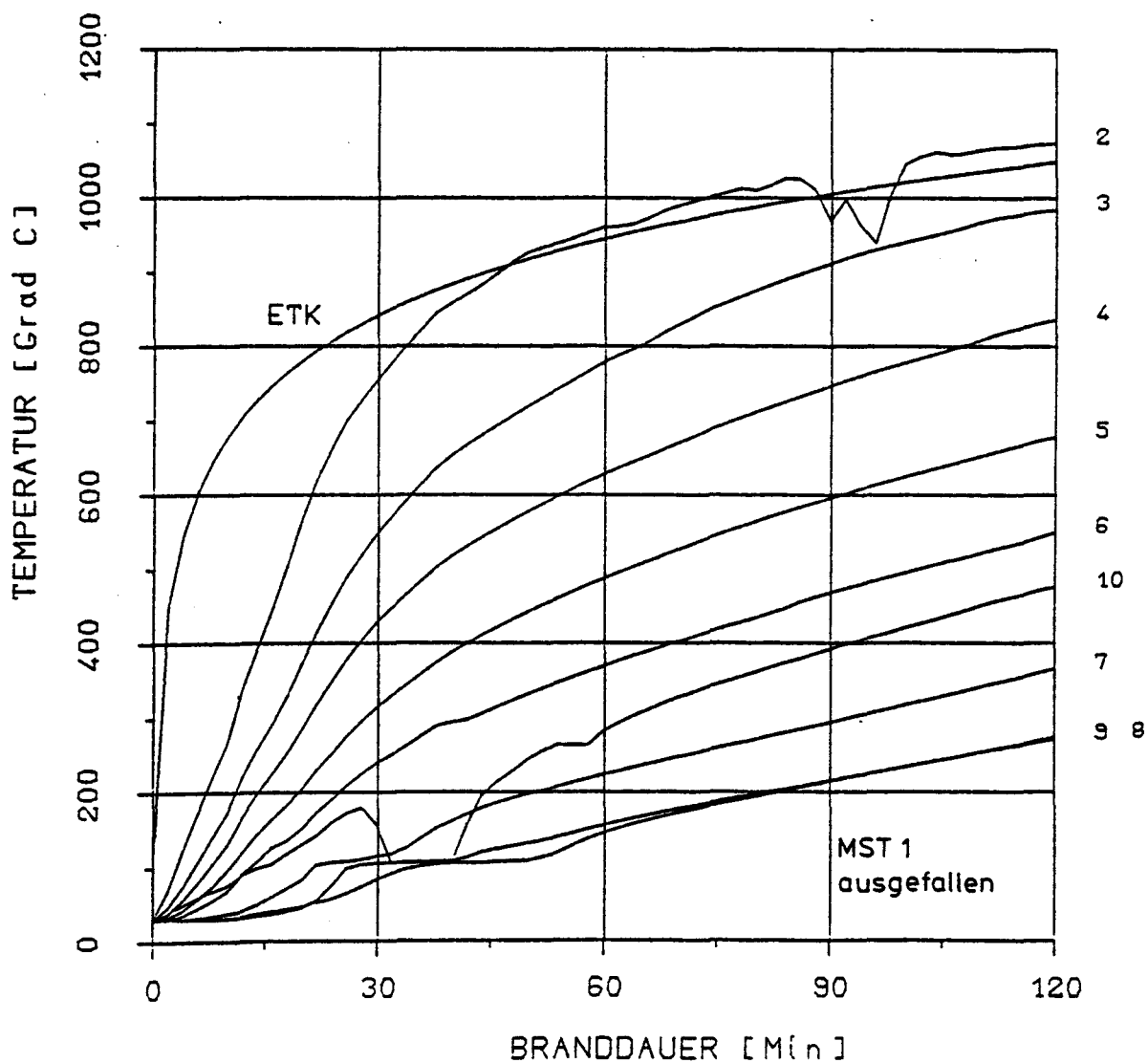
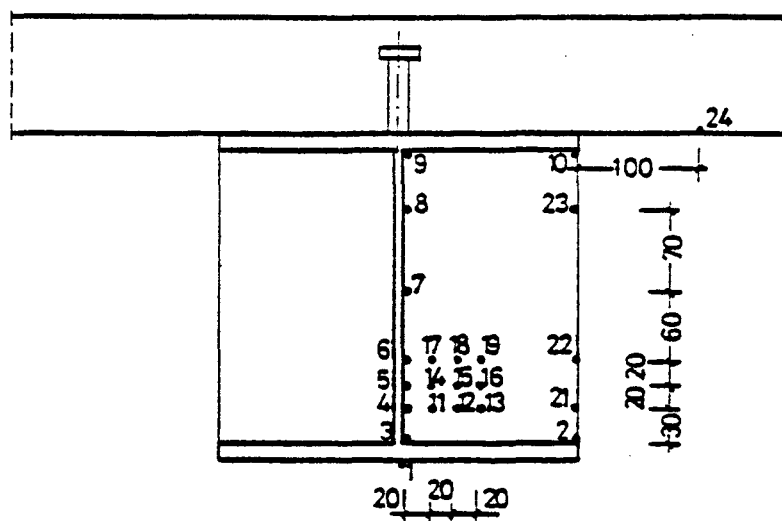
Anlage 20: Temperaturentwicklung im Stahlträger,
Versuchskörper E-300: Meßquerschnitt IIII



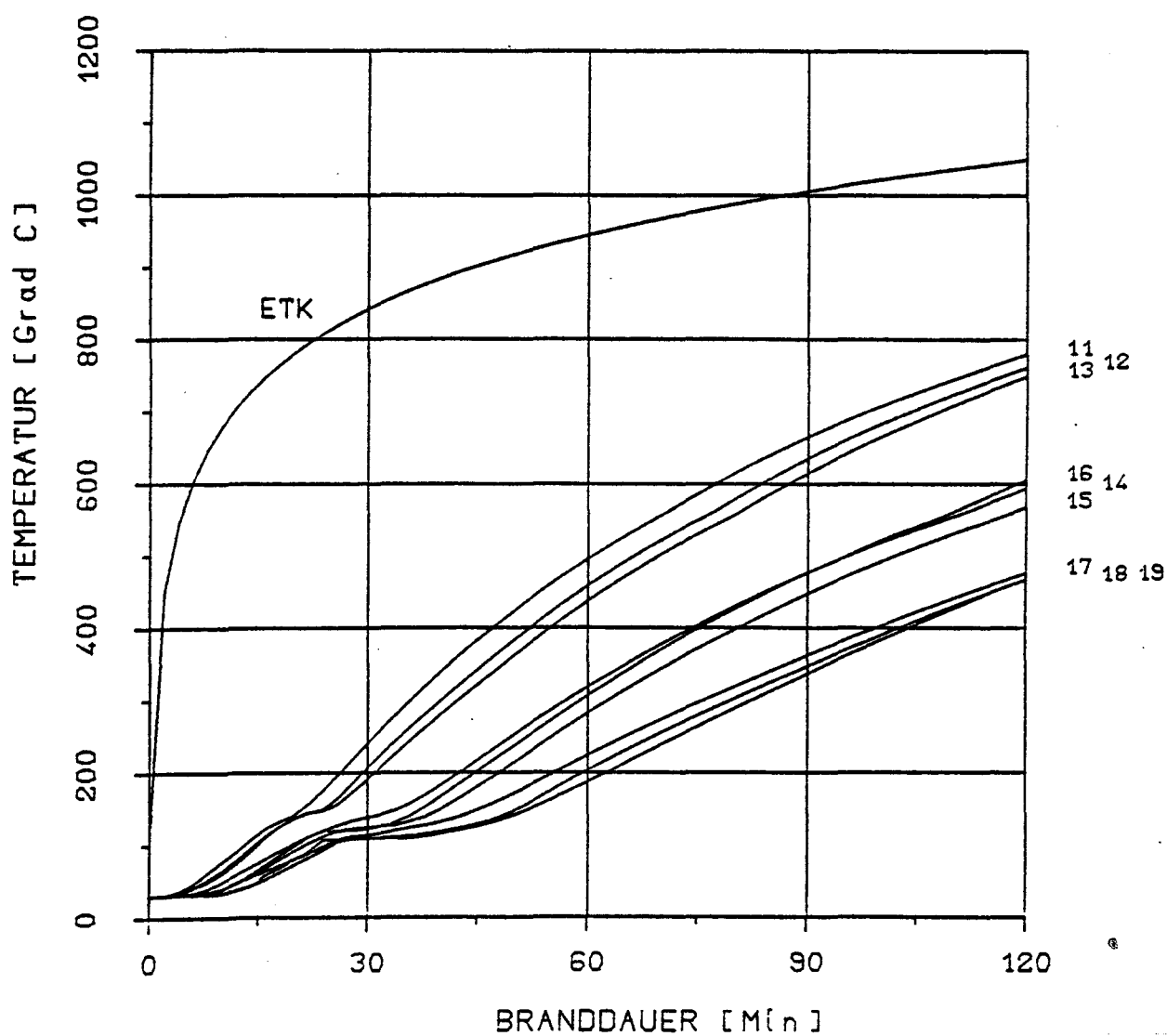
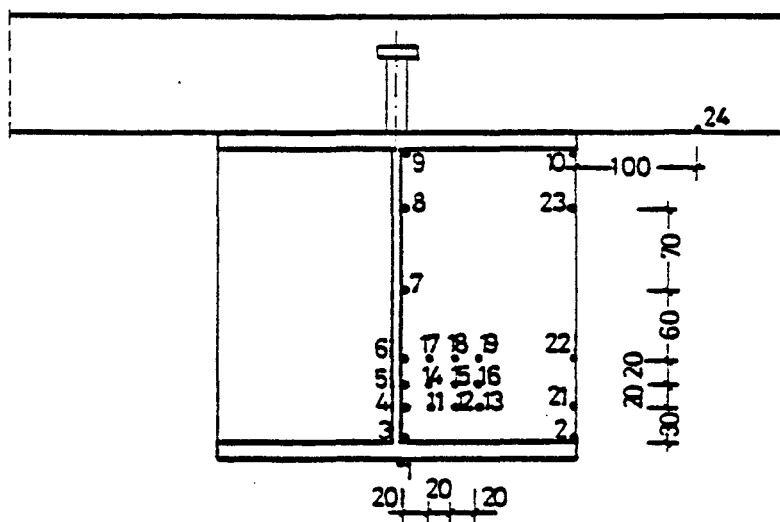
Anlage 21: Temperaturentwicklung im Betonquerschnitt,
Versuchskörper E-300: Meßquerschnitt III



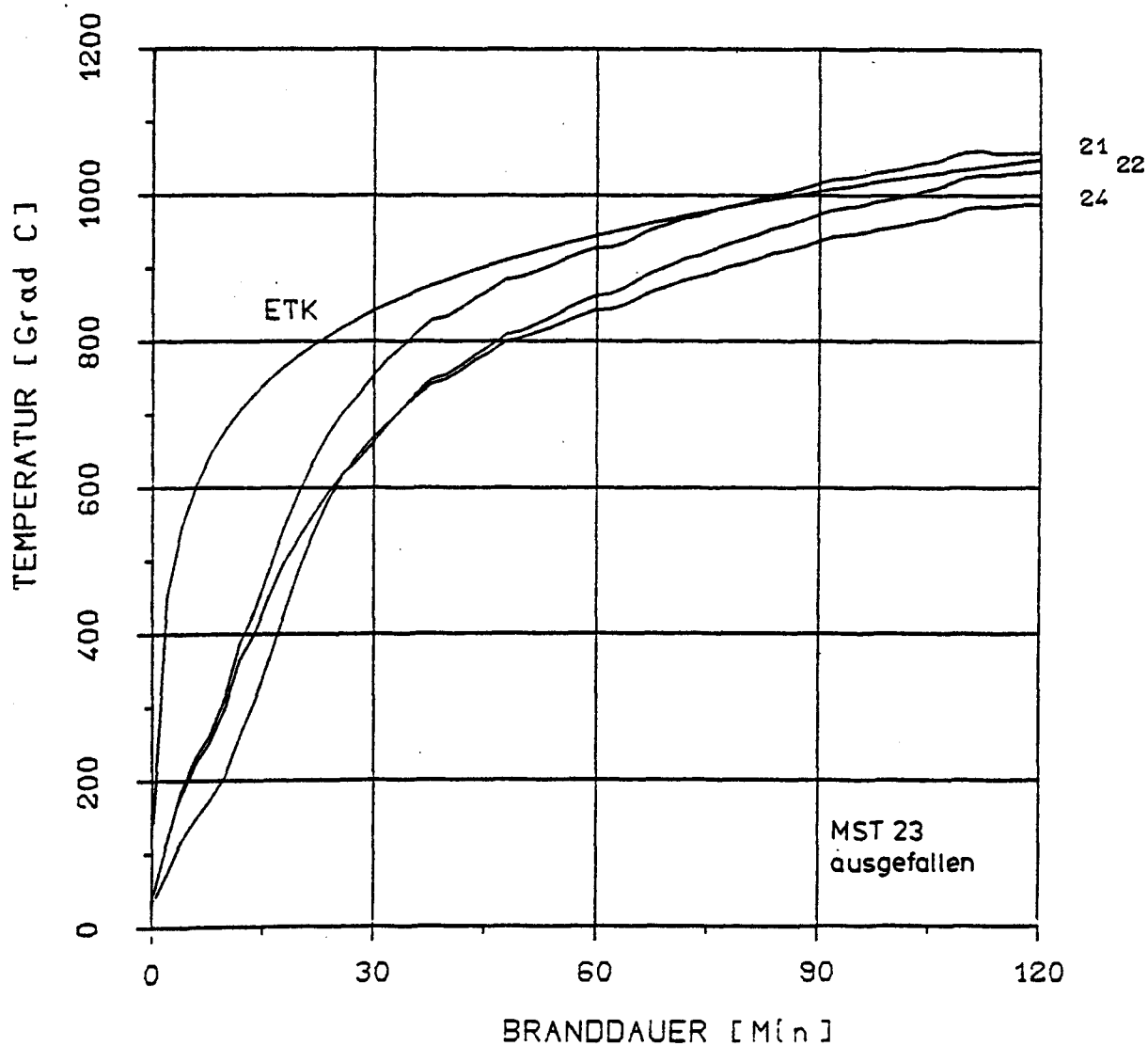
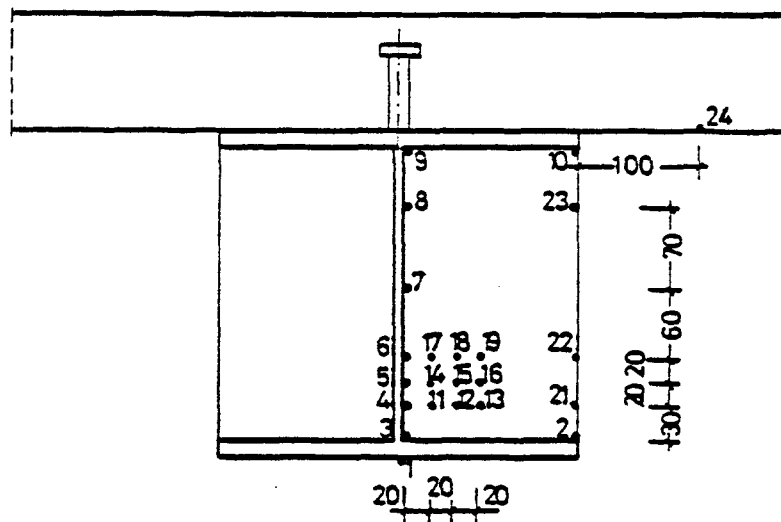
Anlage 22: Temperaturentwicklung an der Betonoberfläche,
Versuchskörper E-300: Meßquerschnitt III



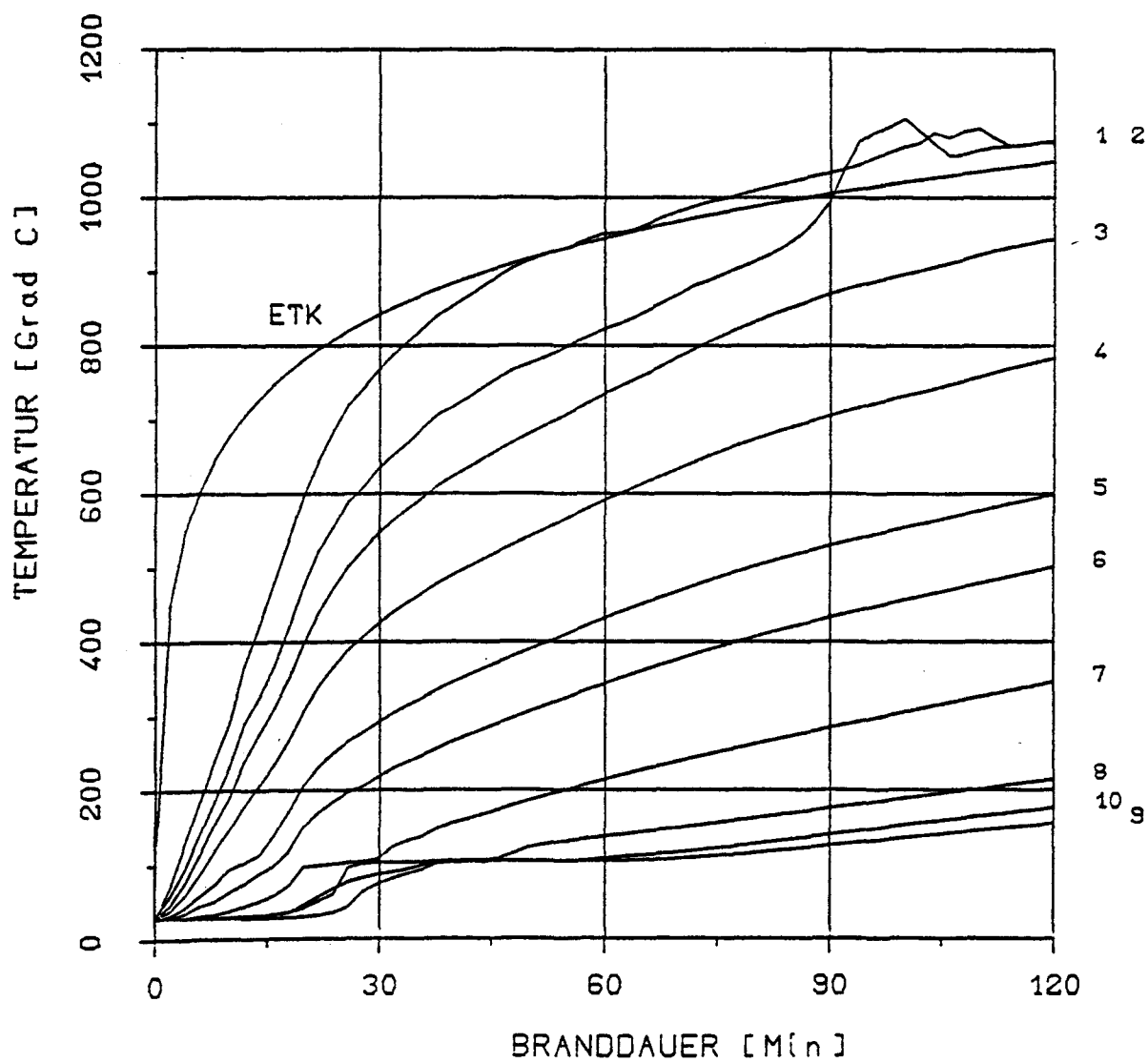
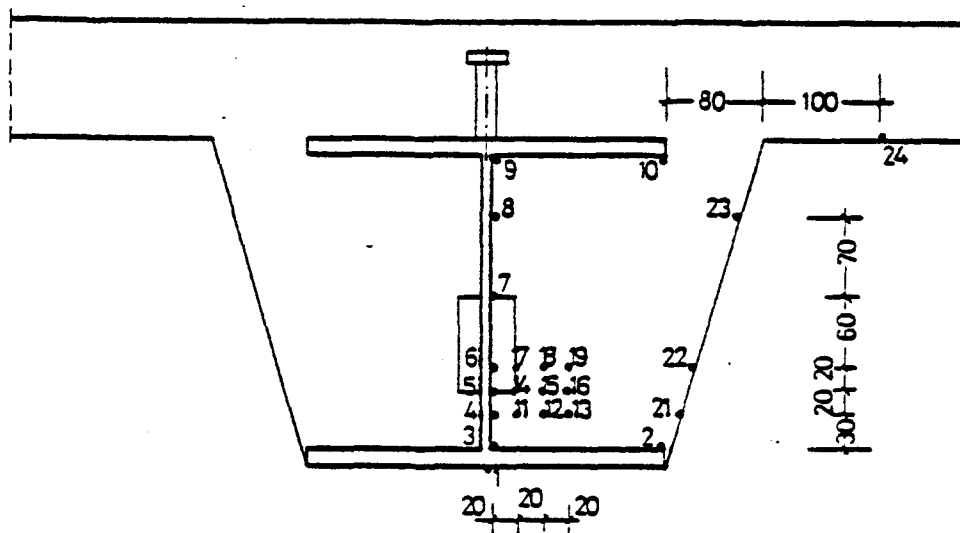
**Anlage 23: Temperaturentwicklung im Stahlträger,
Versuchskörper A-300: Meßquerschnitt I**



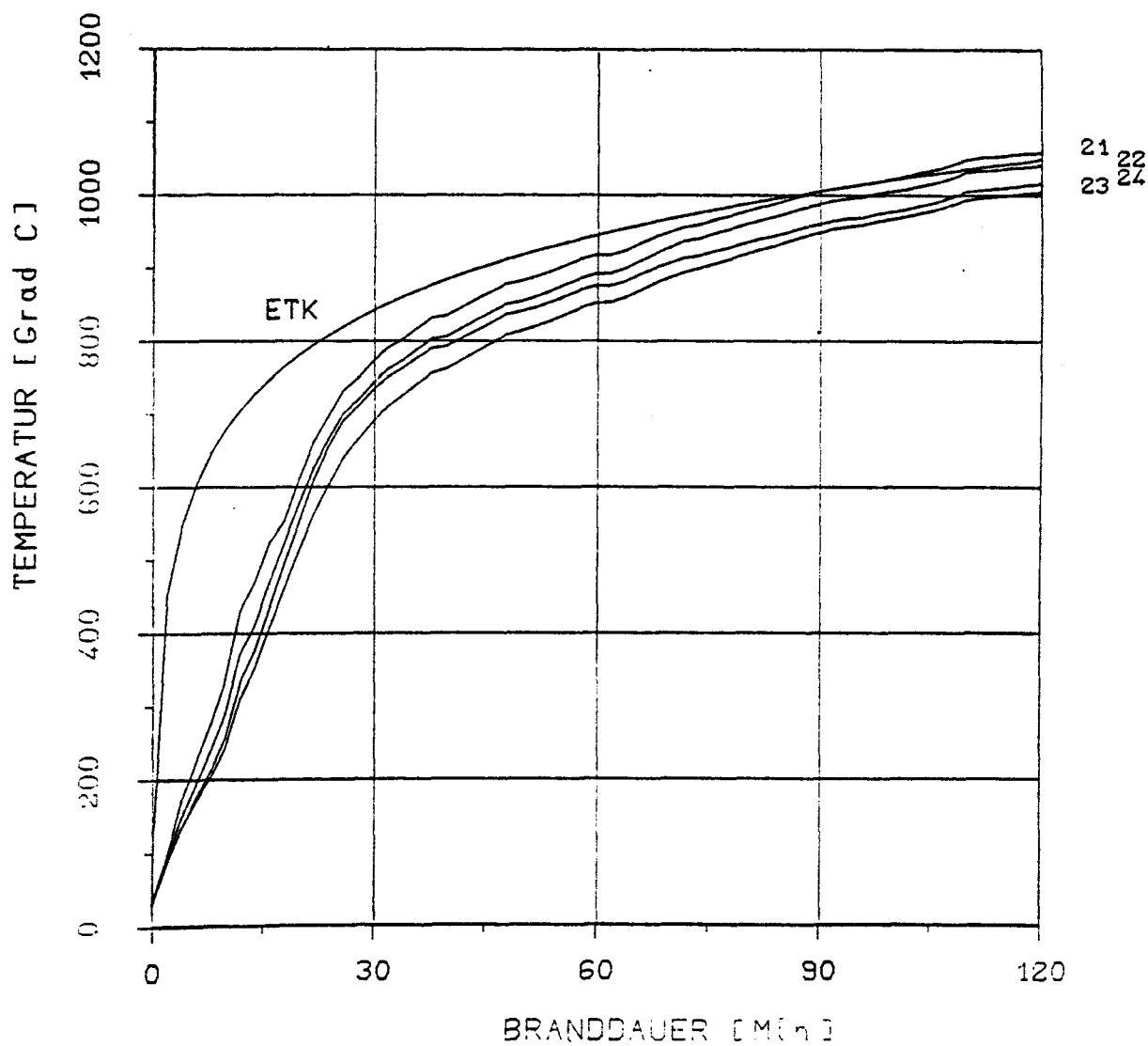
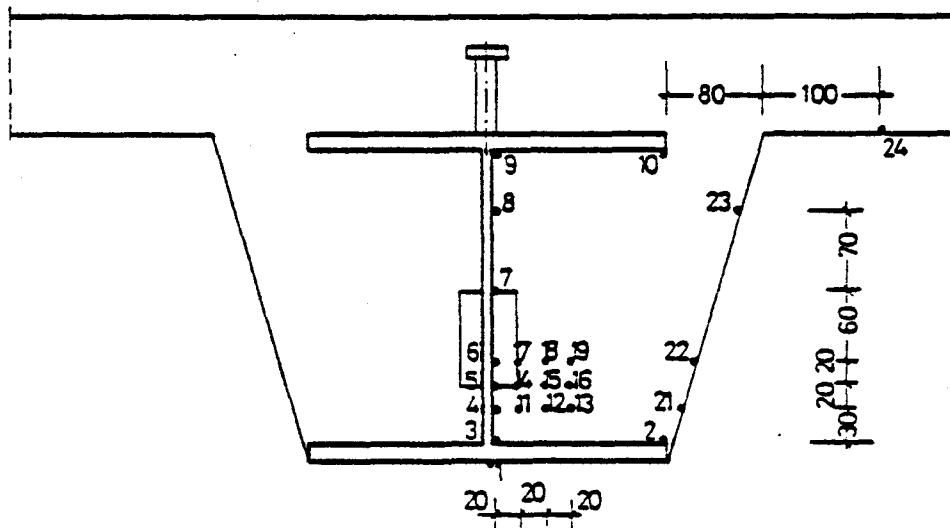
**Anlage 24: Temperaturentwicklung im Betonquerschnitt,
Versuchskörper A-300: Meßquerschnitt I**



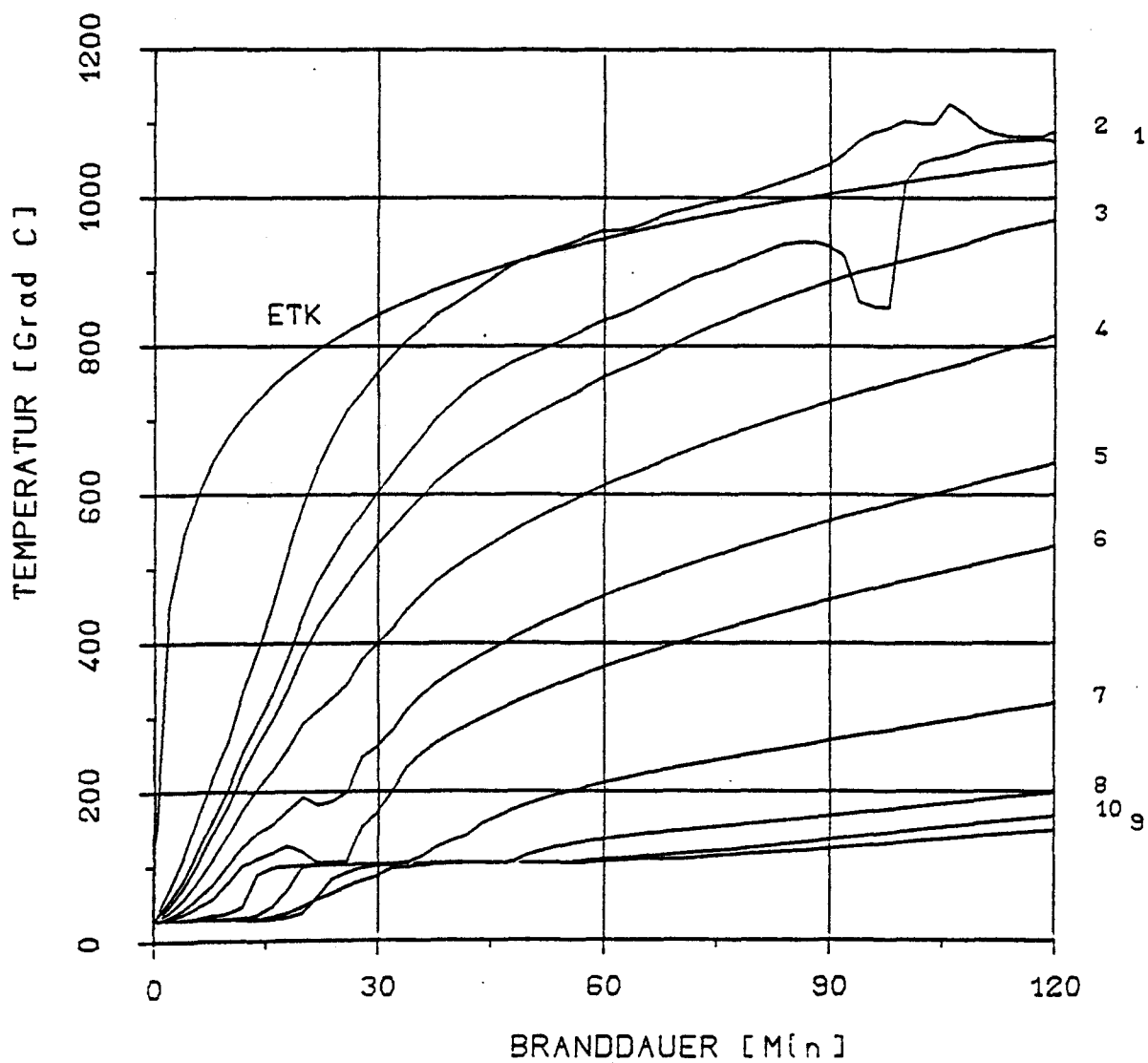
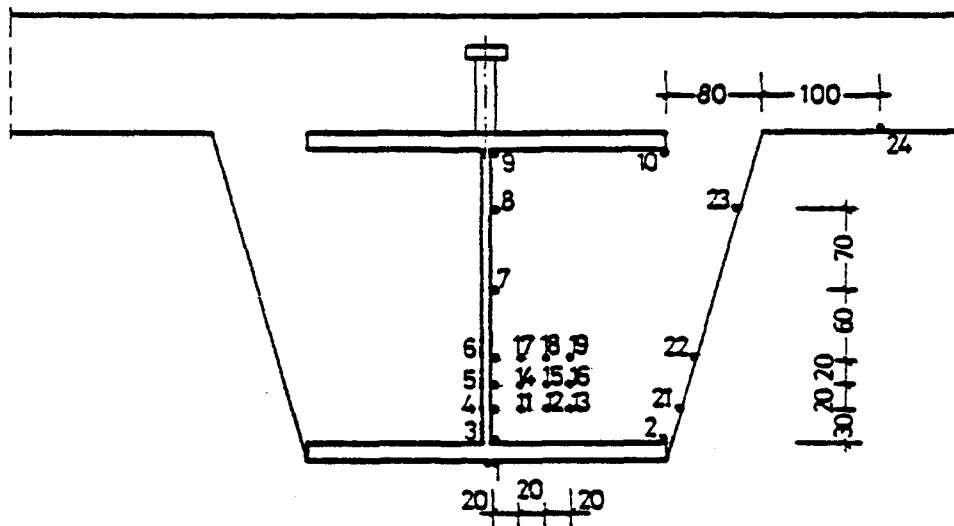
**Anlage 25: Temperaturentwicklung an der Betonoberfläche,
Versuchskörper A-300, Meßquerschnitt I**



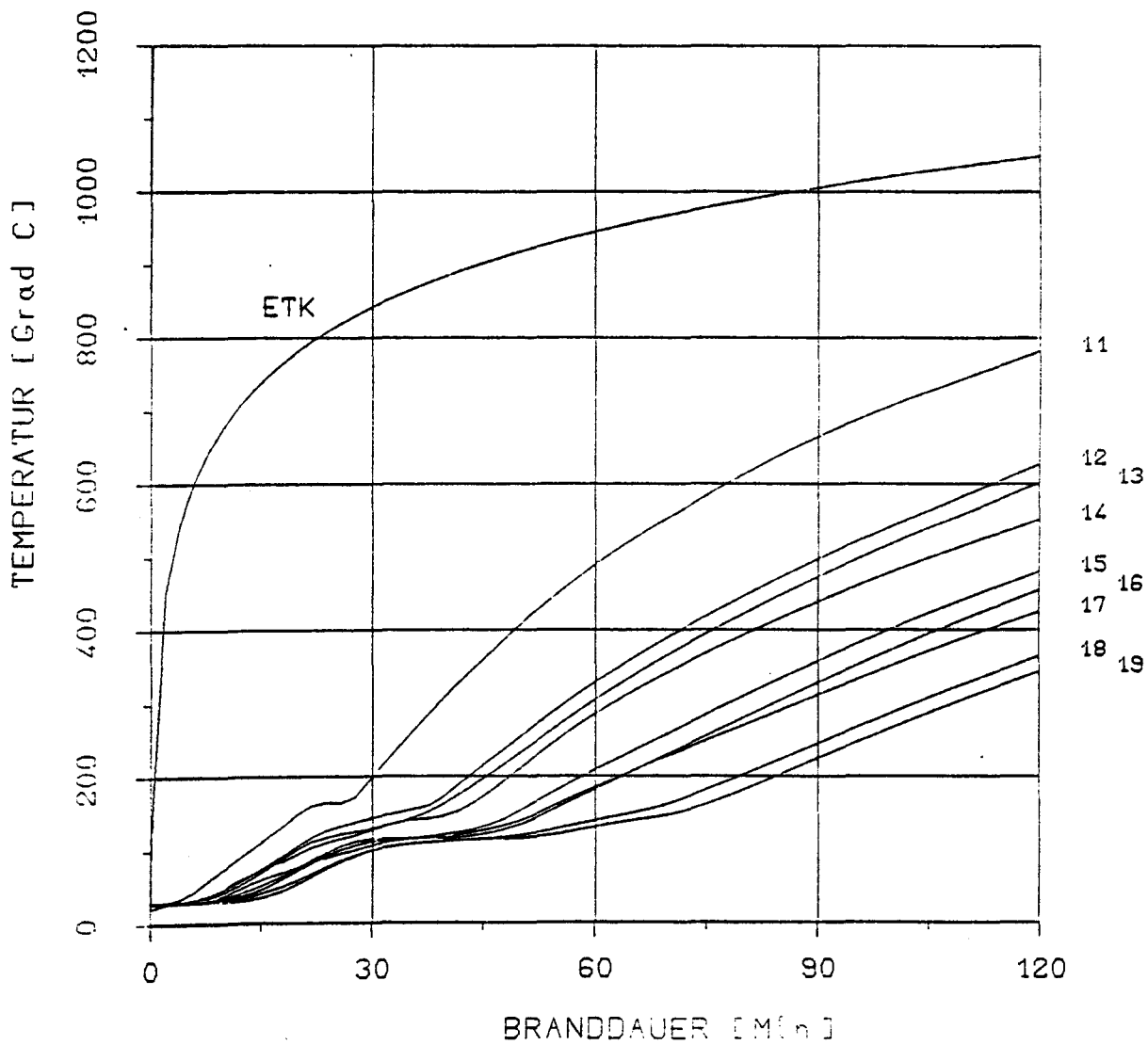
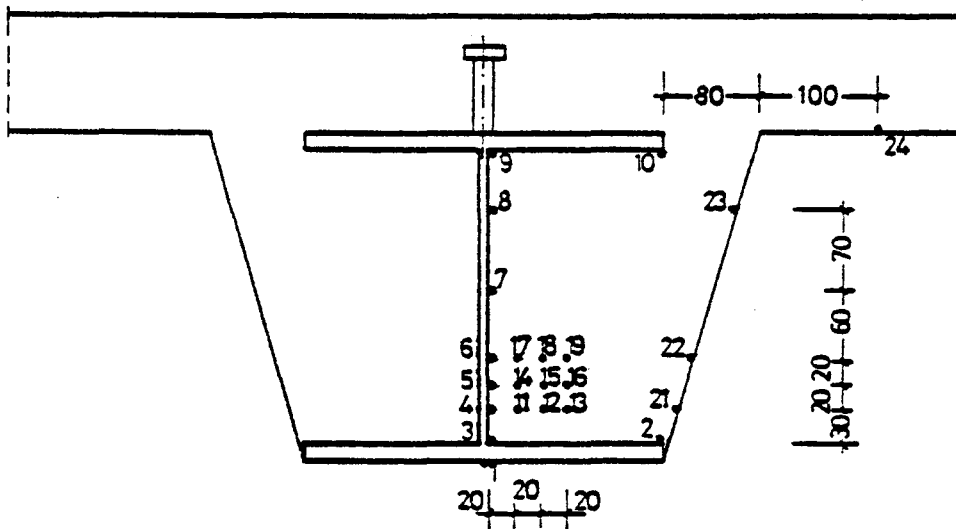
**Anlage 26: Temperaturentwicklung im Stahlträger,
Versuchskörper A-300, Meßquerschnitt II**



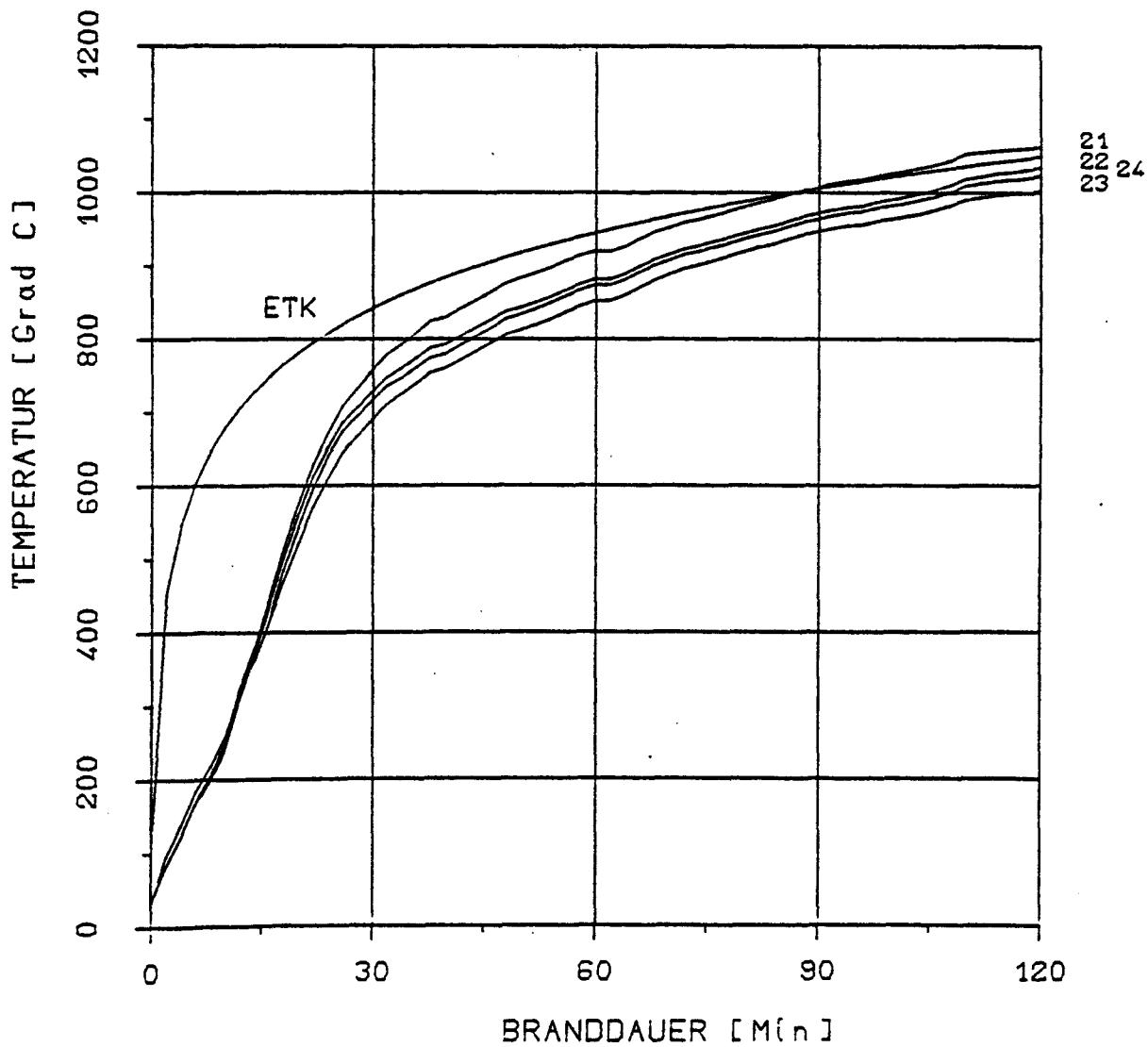
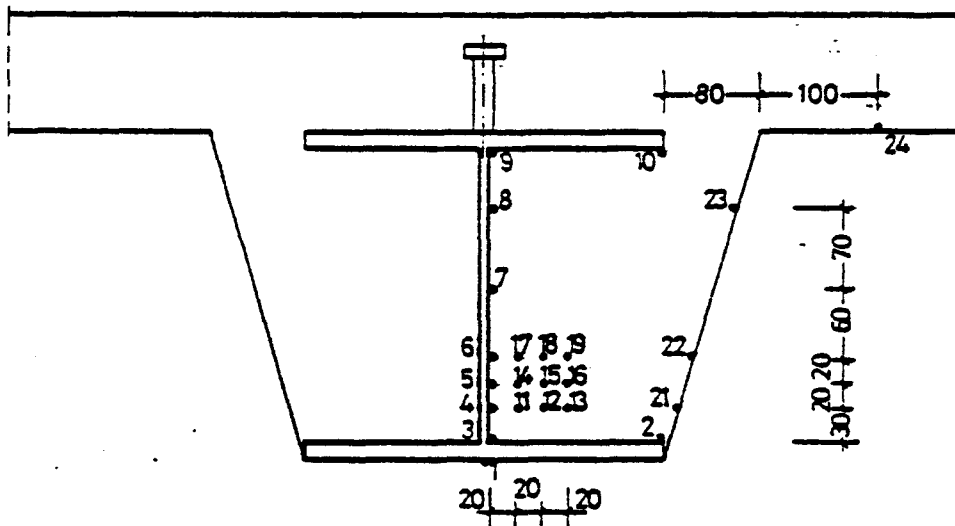
Anlage 28: Temperaturentwicklung an der Betonoberfläche,
Versuchskörper A-300, Meßquerschnitt II



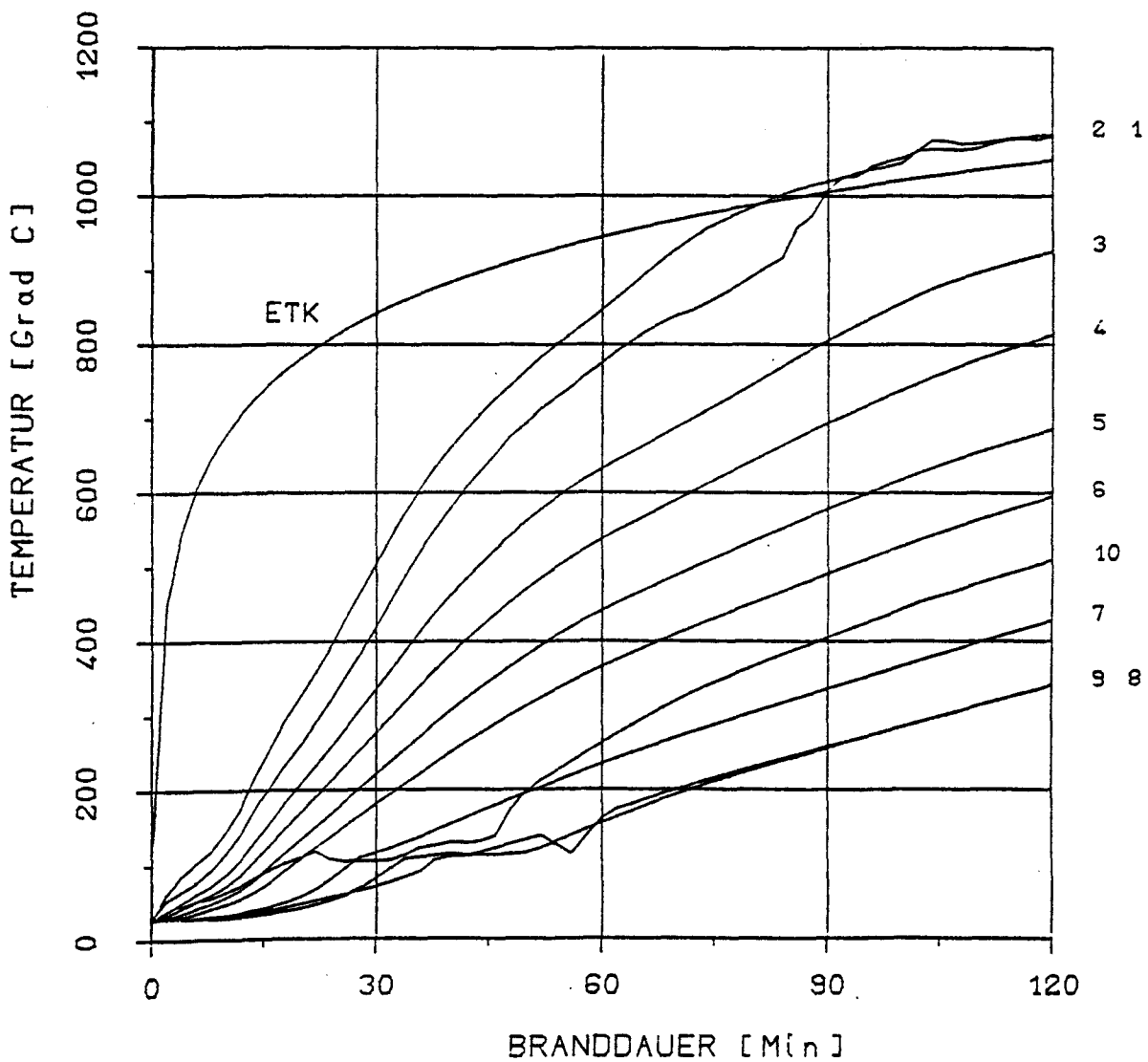
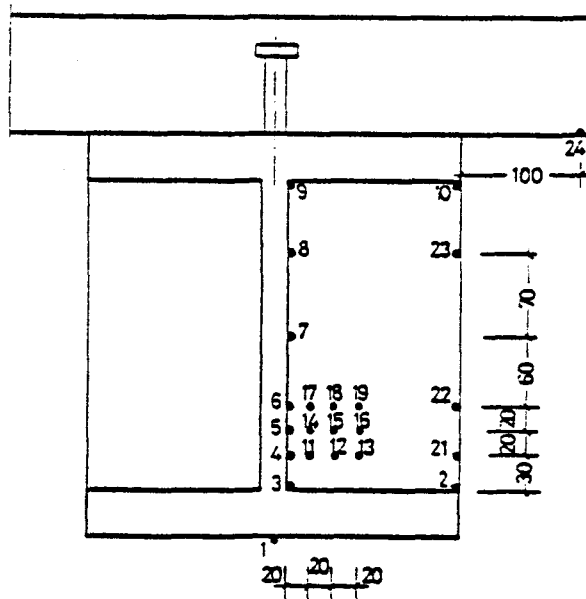
Anlage 29: Temperaturentwicklung im Stahlträger,
Versuchskörper A-300, Meßquerschnitt III



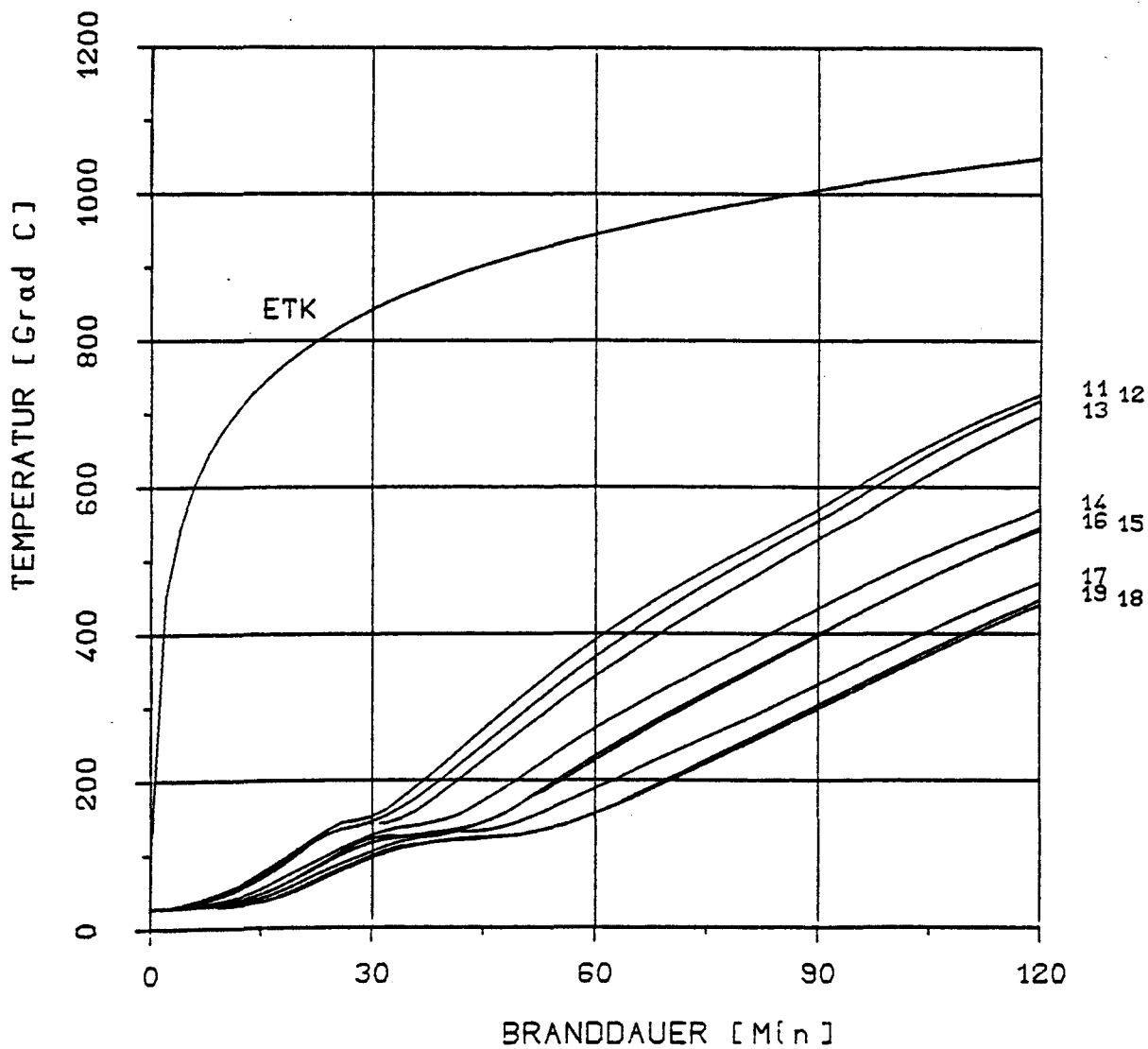
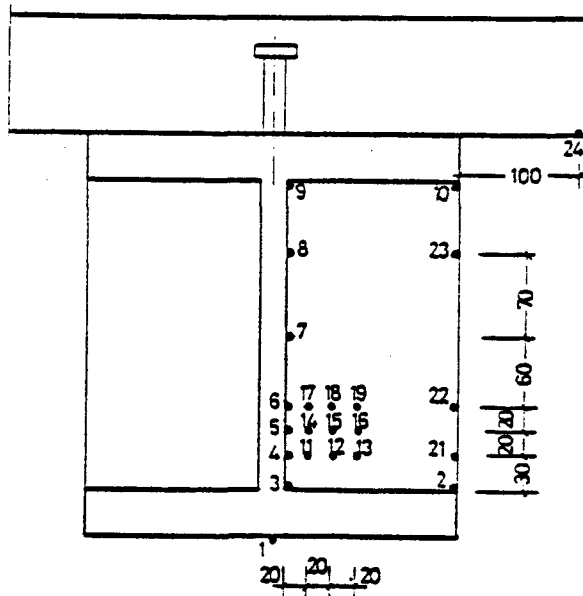
**Anlage 30: Temperaturentwicklung im Betonquerschnitt,
Versuchskörper A-300, Meßquerschnitt III**



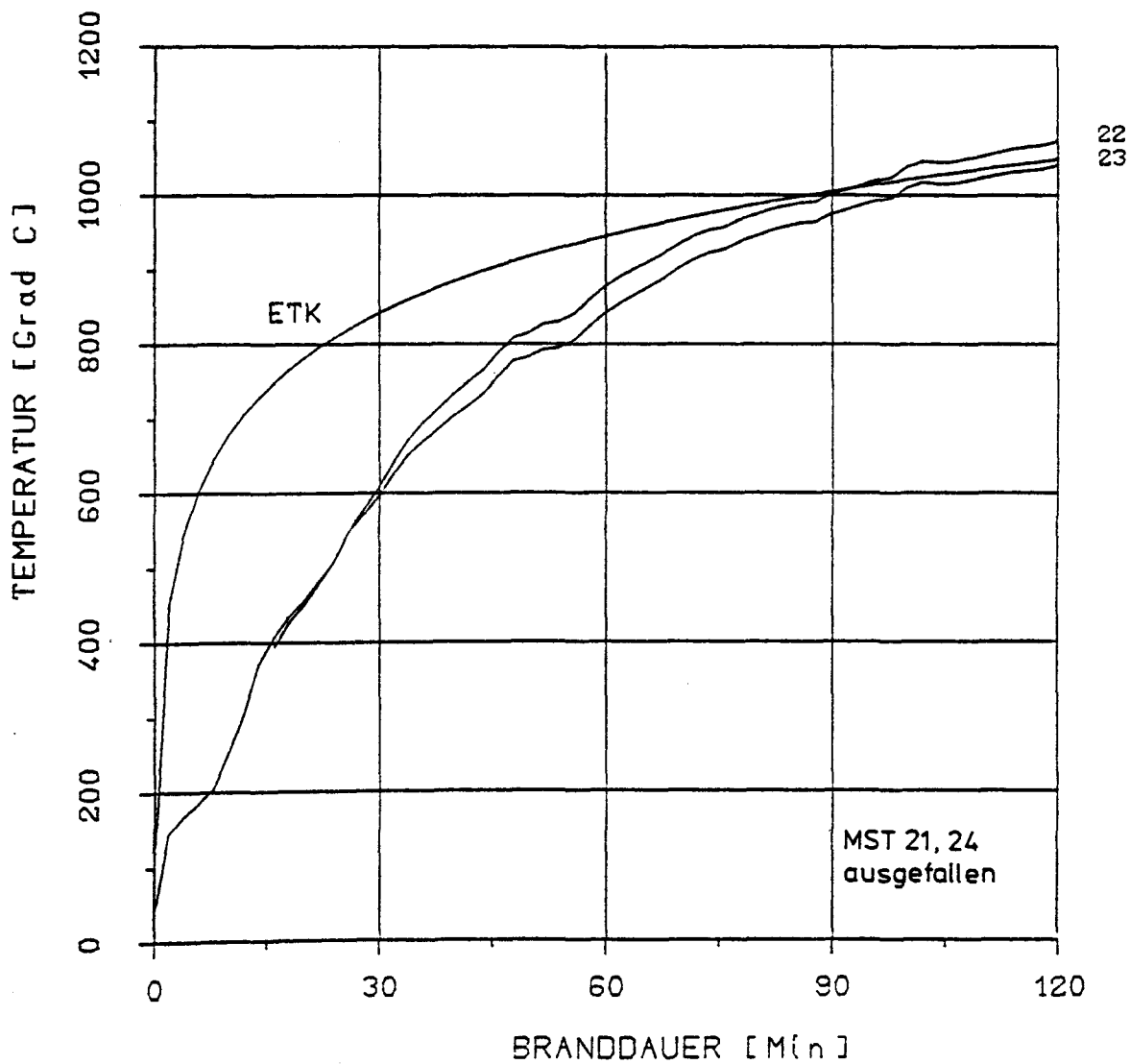
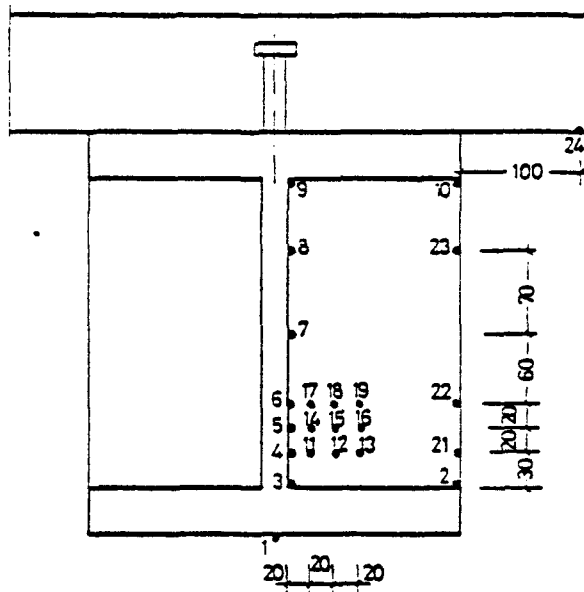
Anlage 31: Temperaturentwicklung an der Betonoberfläche,
Versuchskörper A-300, Meßquerschnitt III



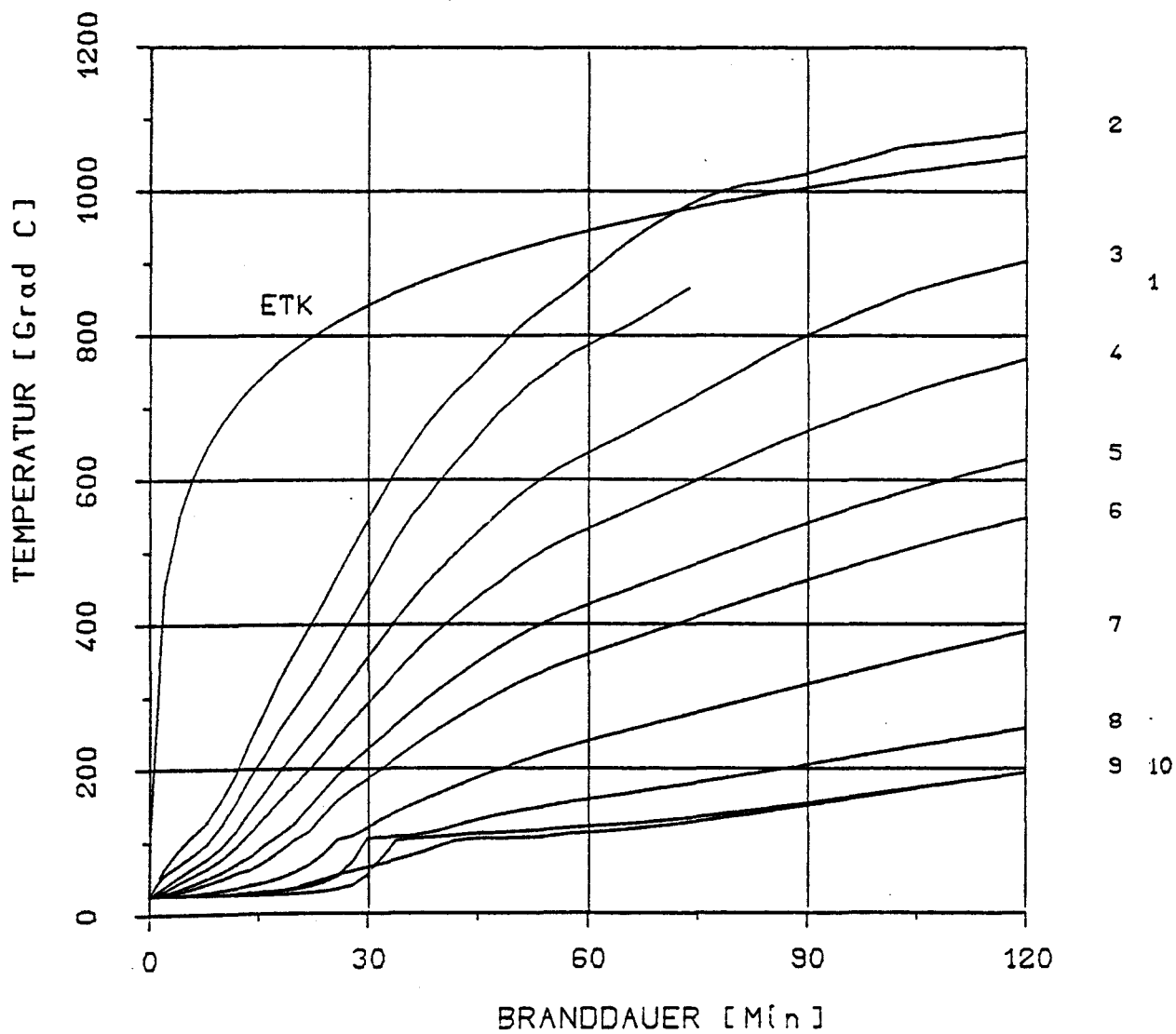
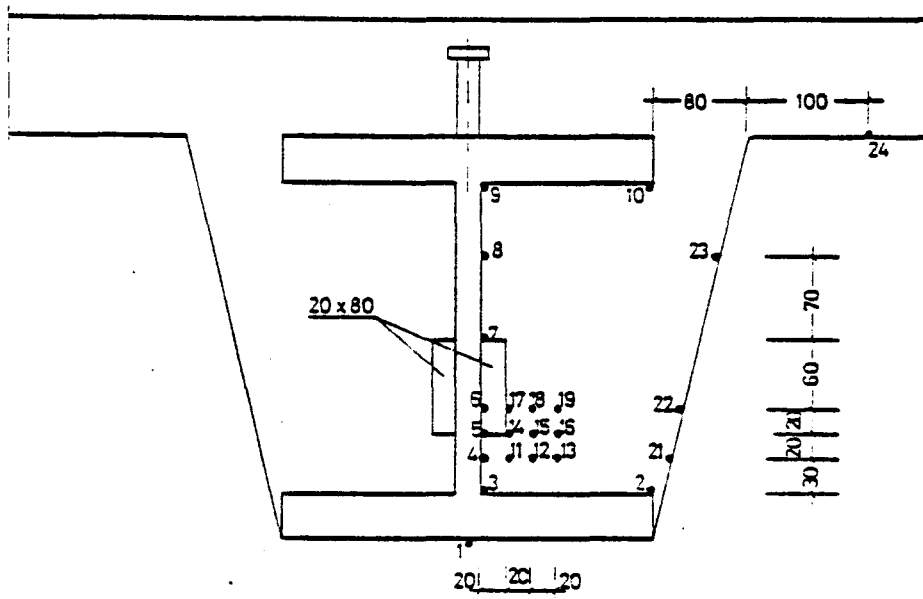
**Anlage 32: Temperaturentwicklung im Stahlträger,
Versuchskörper M-300, Meßquerschnitt I**



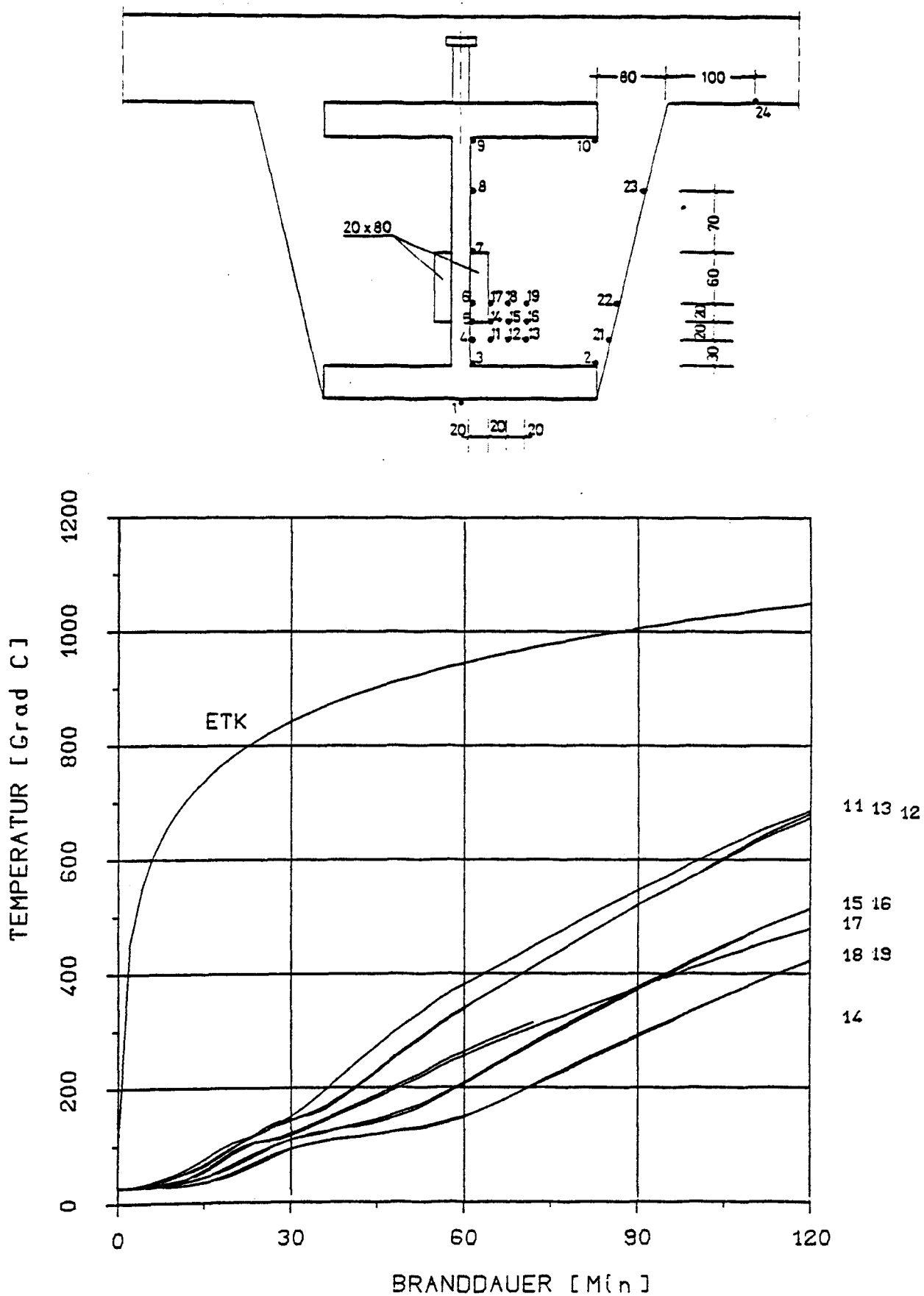
Anlage 33: Temperaturentwicklung im Betonquerschnitt,
Versuchskörper M-300, MeBquerschnitt I



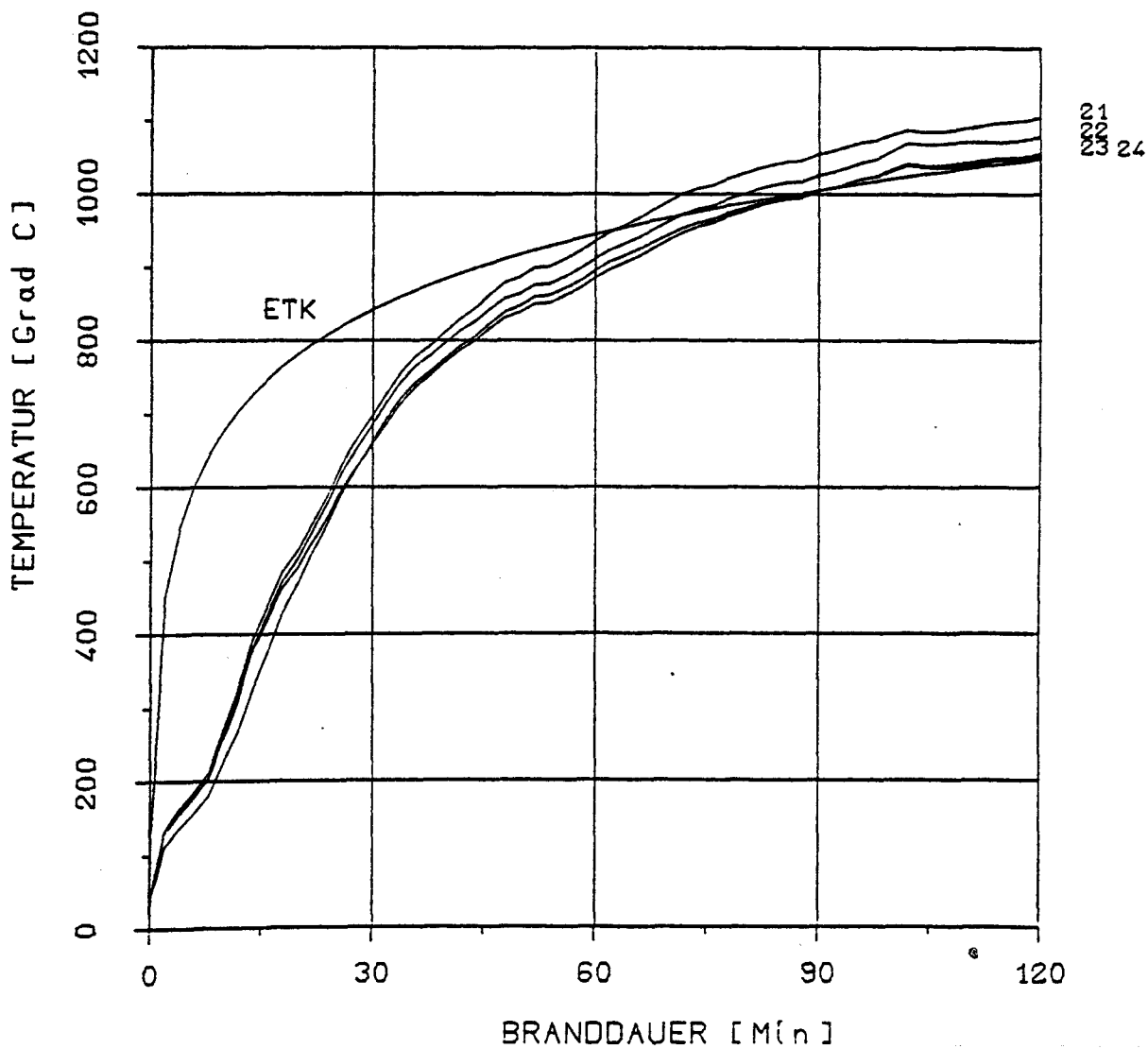
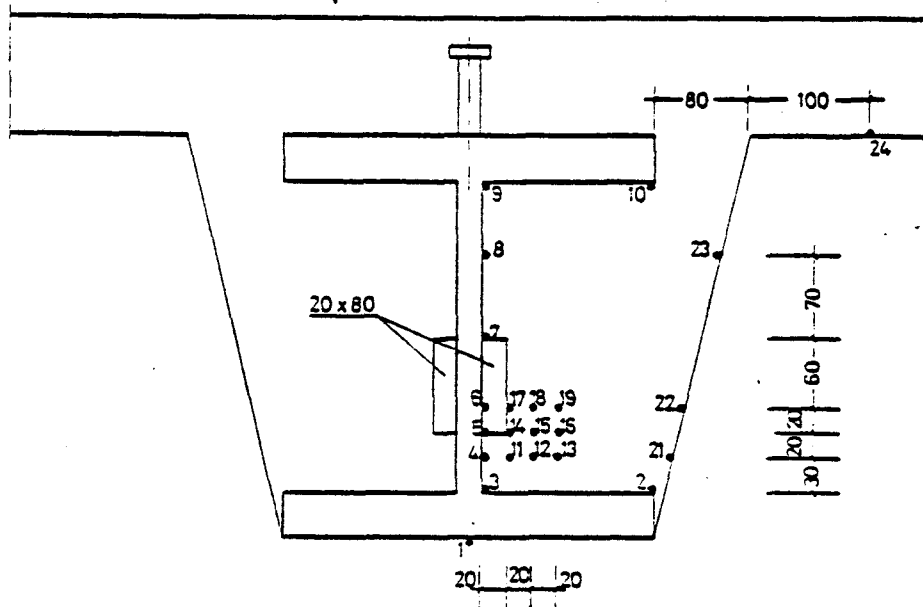
Anlage 34: Temperaturentwicklung an der Betonoberfläche,
Versuchskörper M-300, Meßquerschnitt I



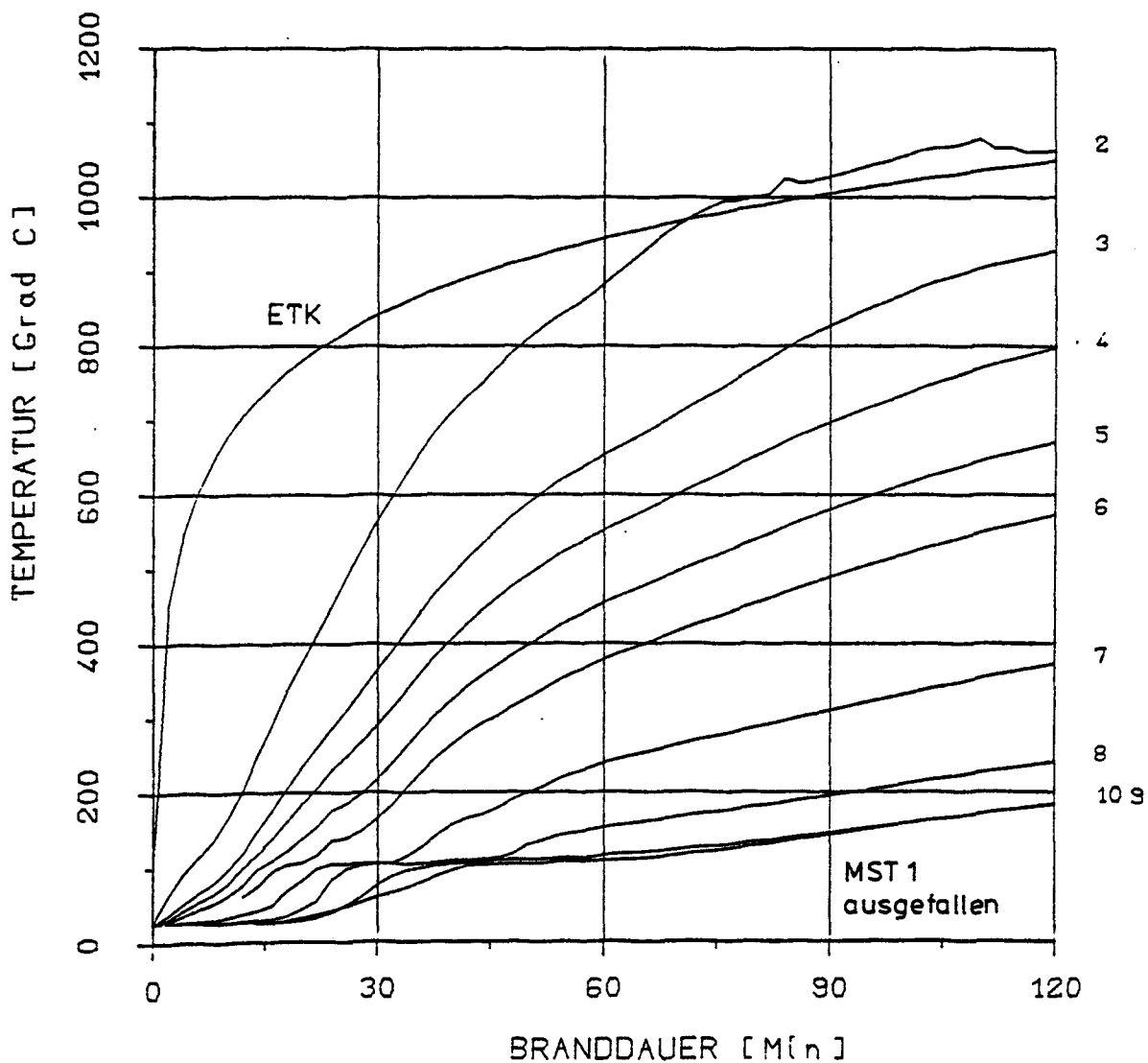
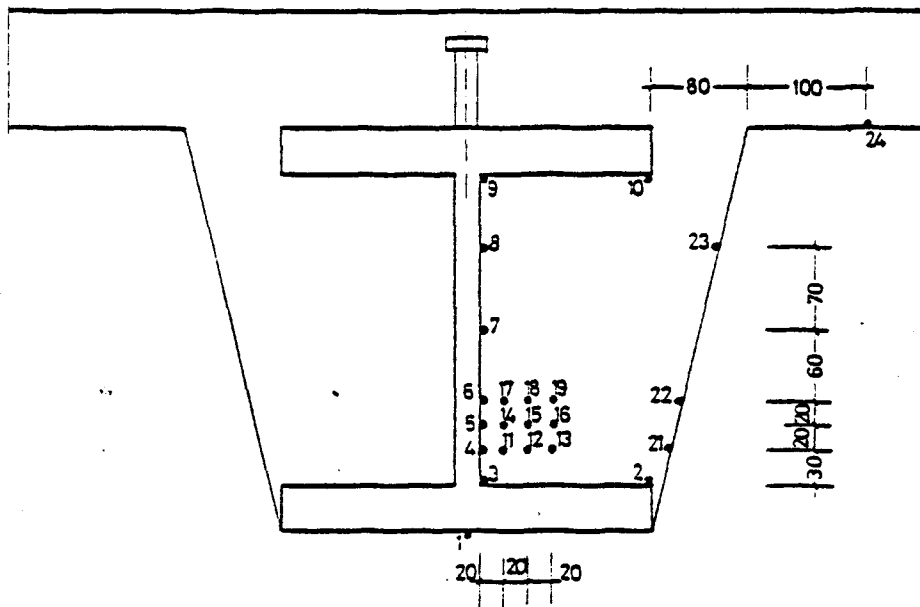
**Anlage 35: Temperaturentwicklung im Stahlträger,
Versuchskörper M-300, Meßquerschnitt II**



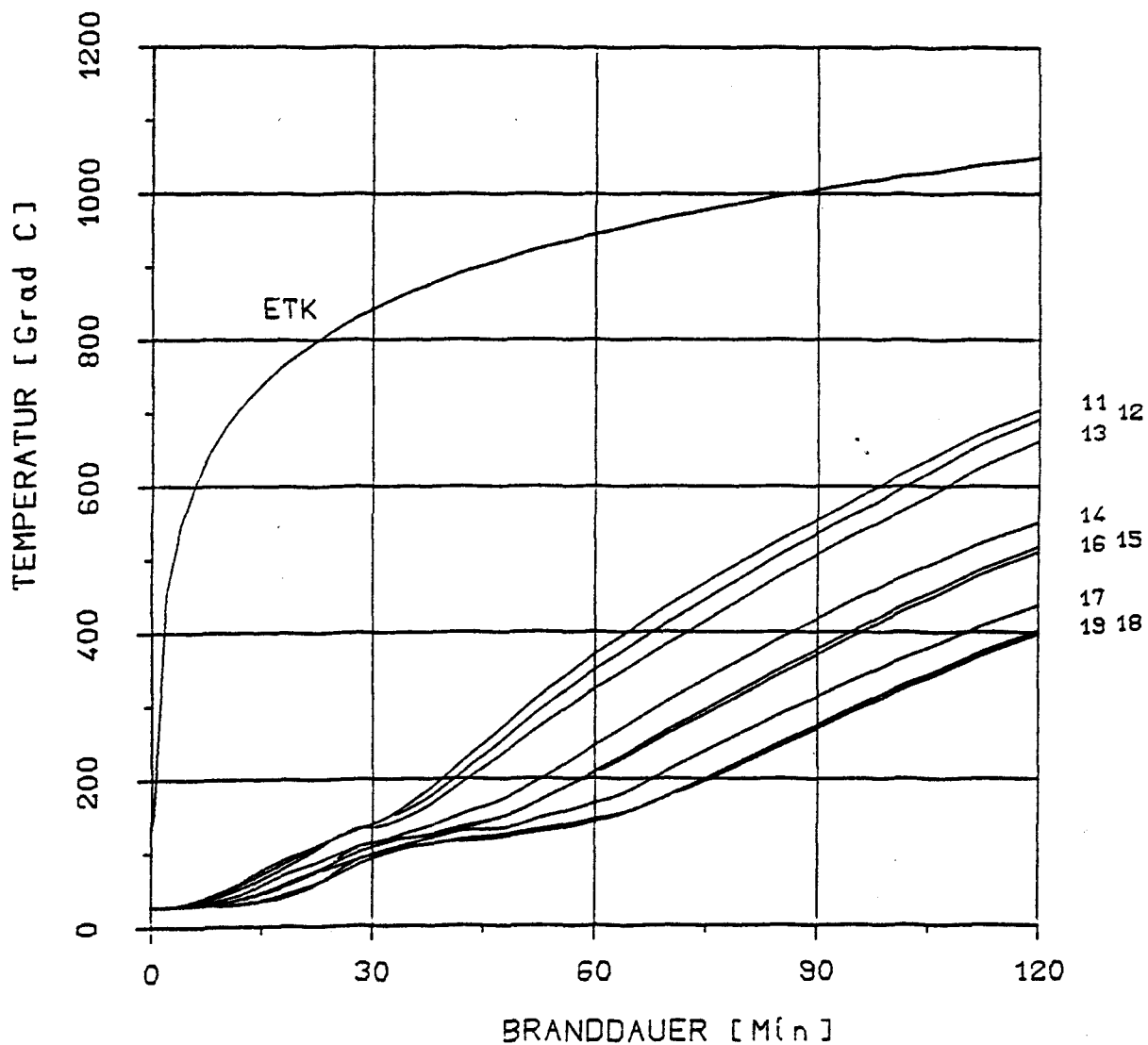
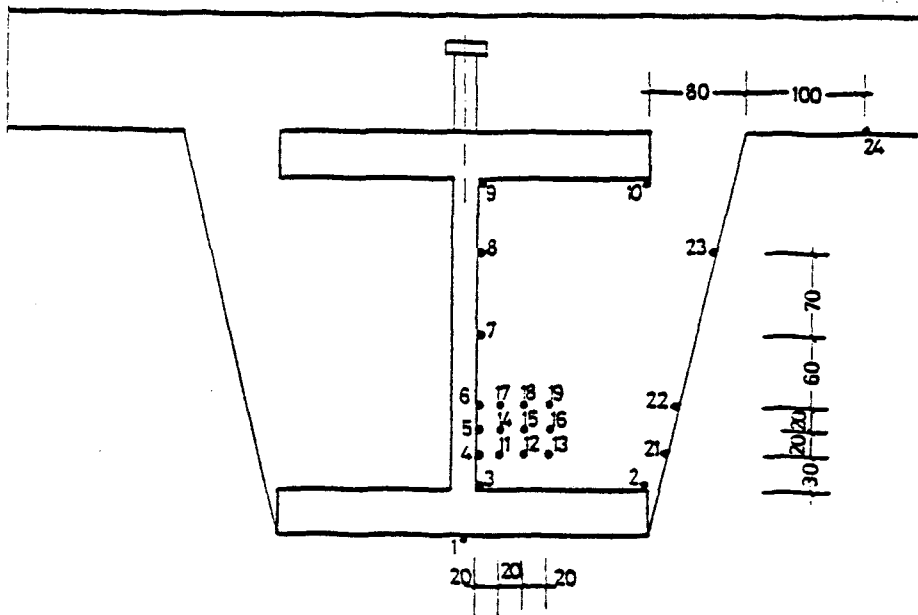
Anlage 36: Temperaturentwicklung im Betonquerschnitt,
Versuchskörper M-300, Meßquerschnitt II



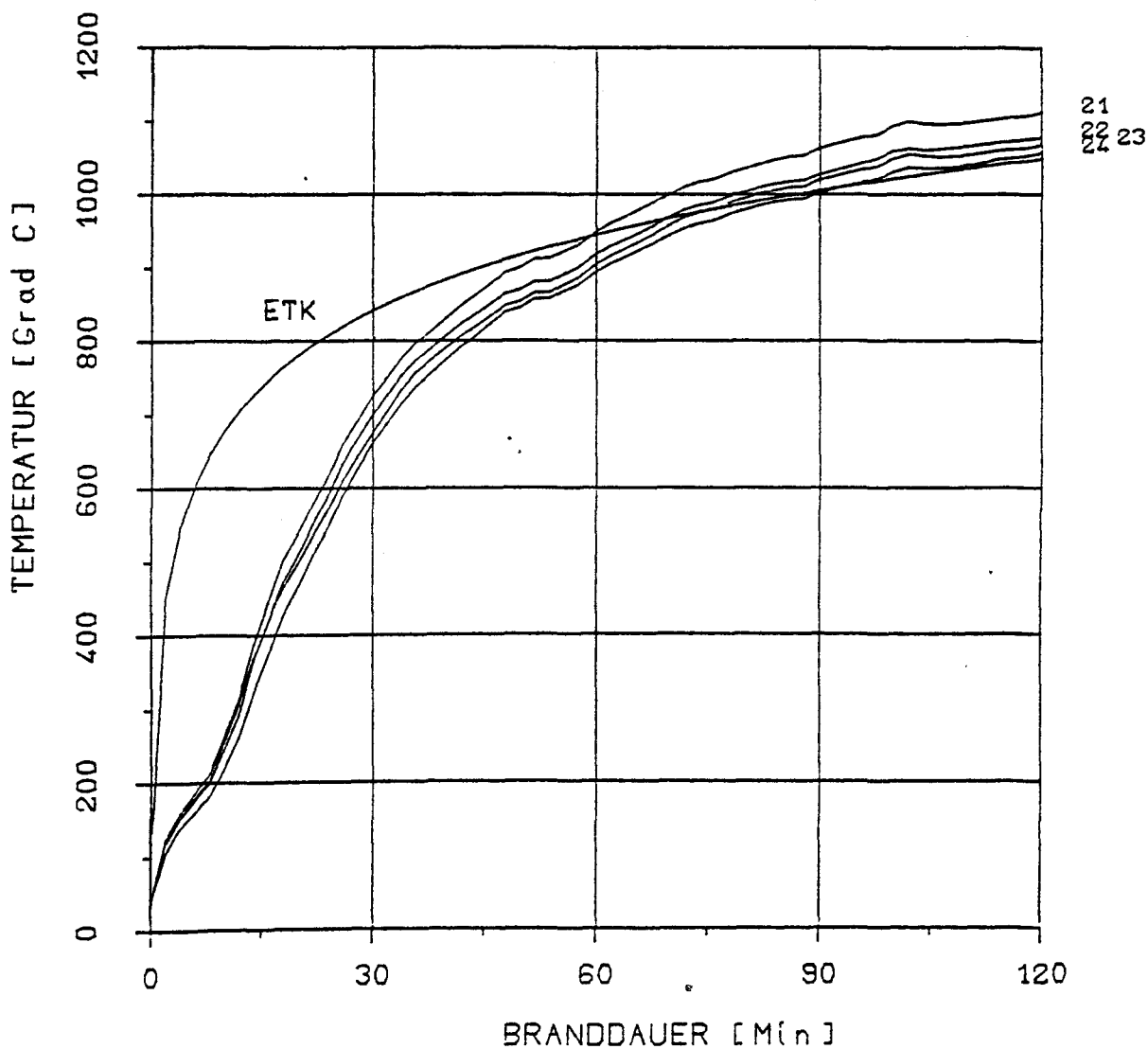
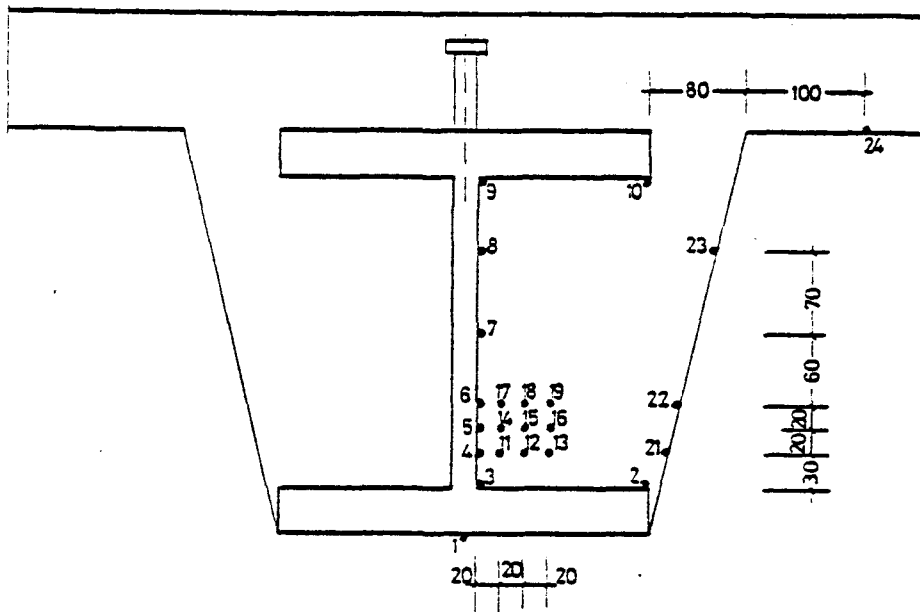
**Anlage 37: Temperaturentwicklung an der Betonoberfläche,
Versuchskörper M-300, Meßquerschnitt II**



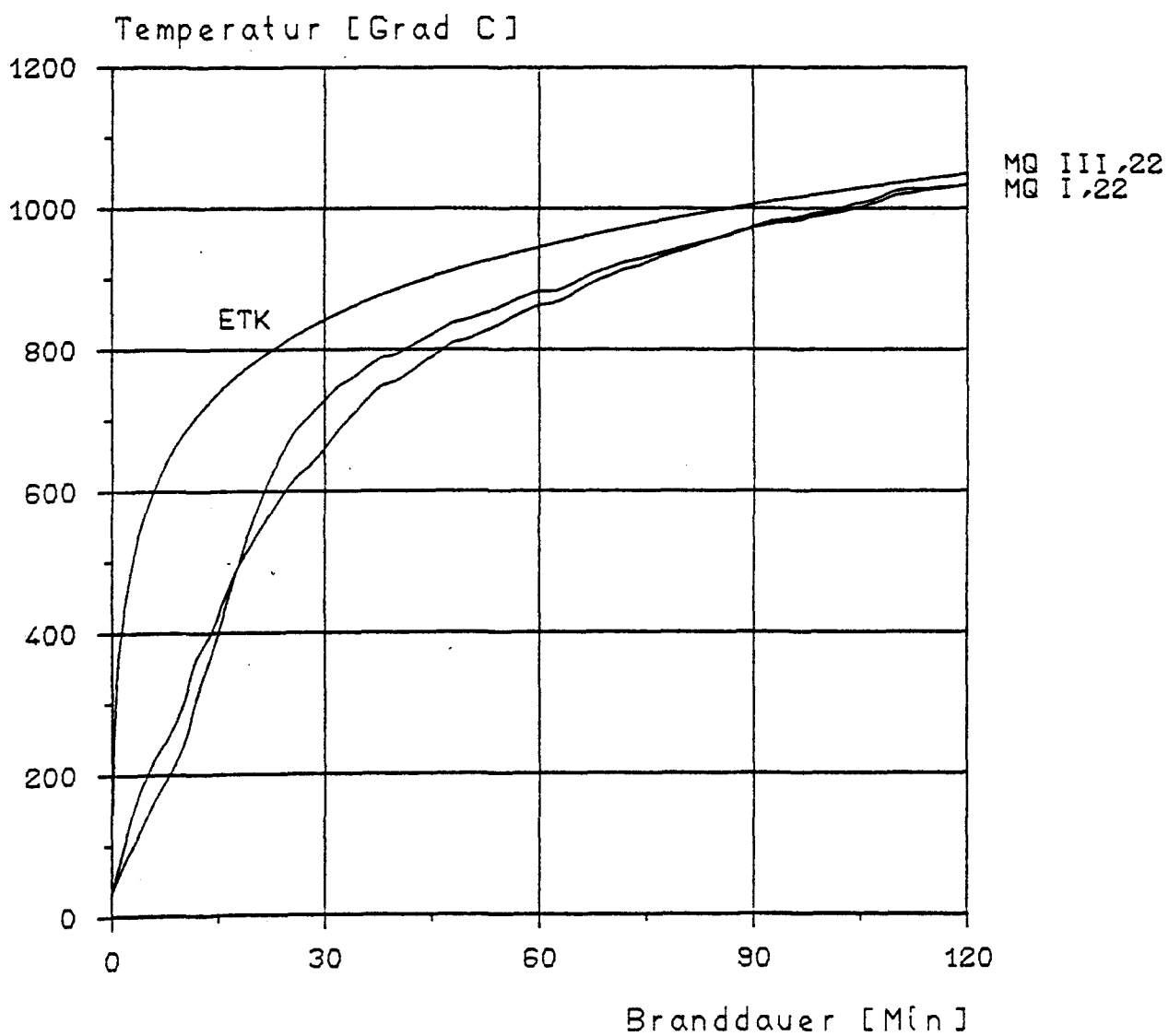
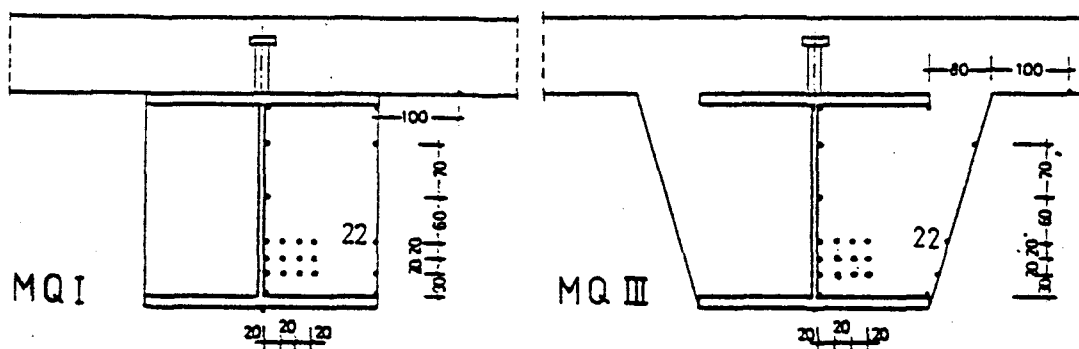
**Anlage 38: Temperaturentwicklung im Stahlträger,
Versuchskörper M-300, Meßquerschnitt III**



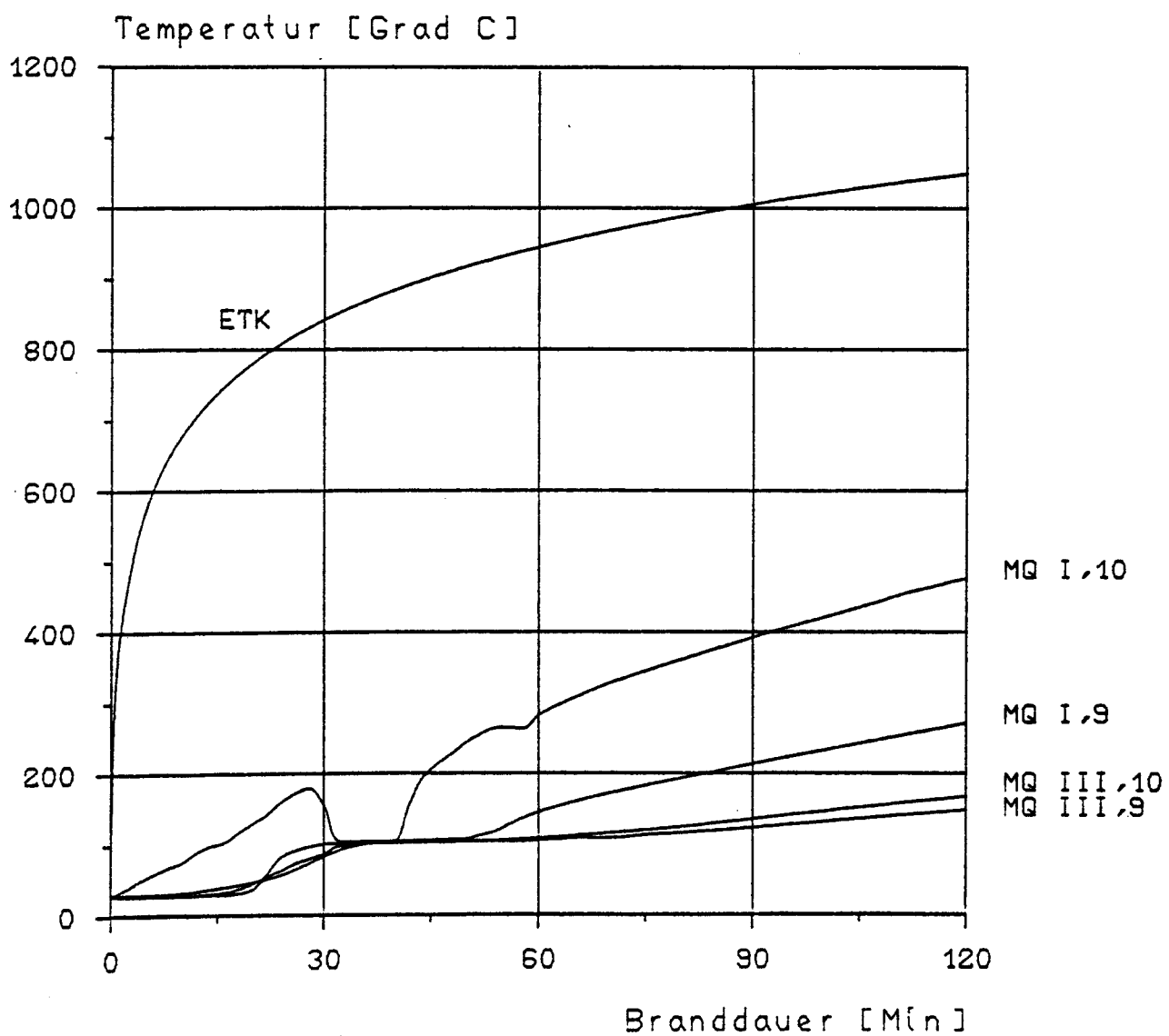
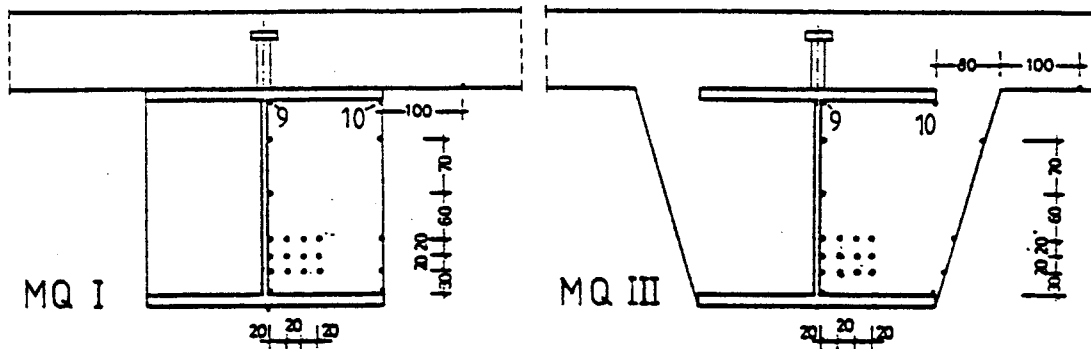
**Anlage 39: Temperaturentwicklung im Betonquerschnitt,
Versuchskörper M-300, Meßquerschnitt IIII**



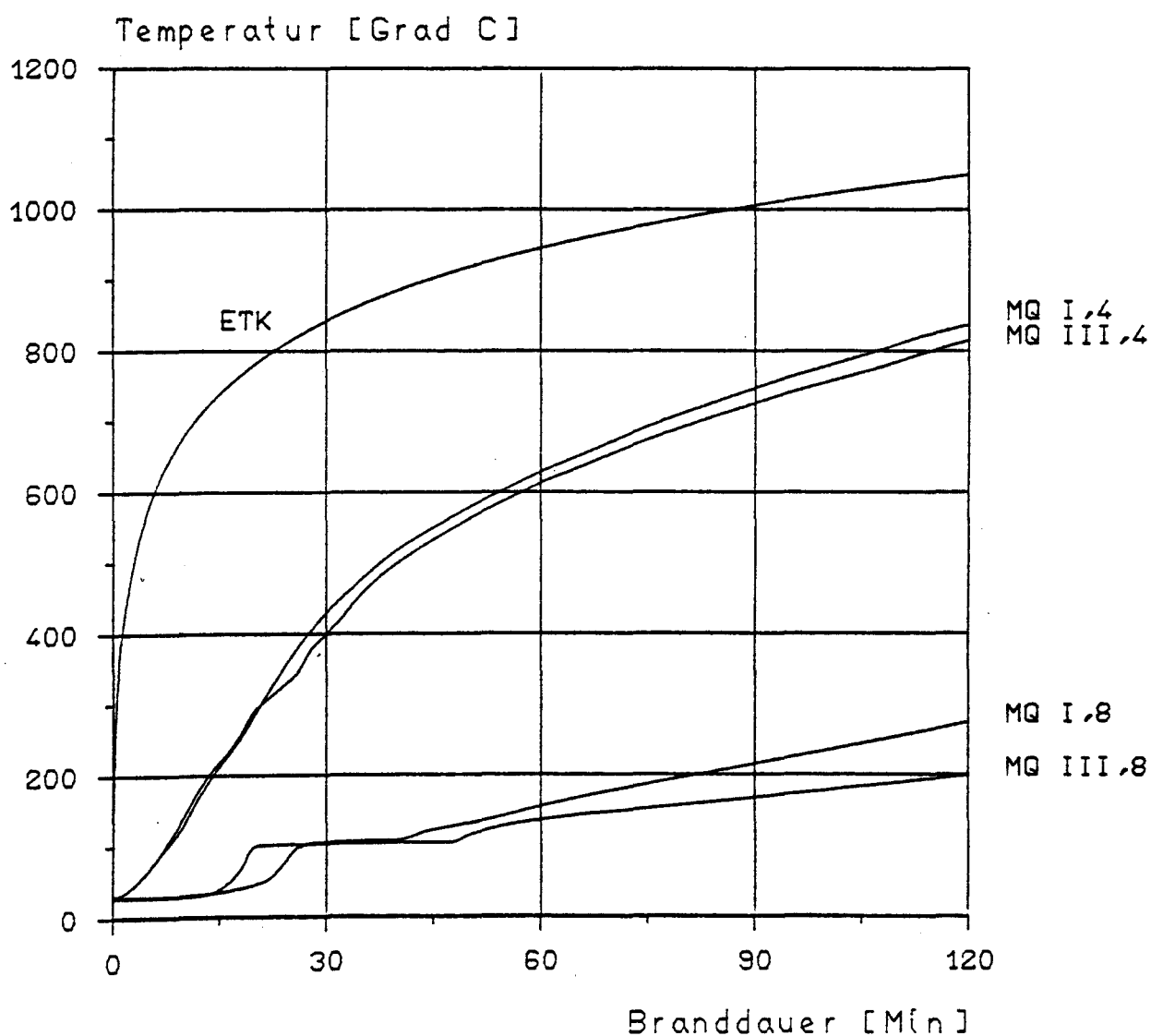
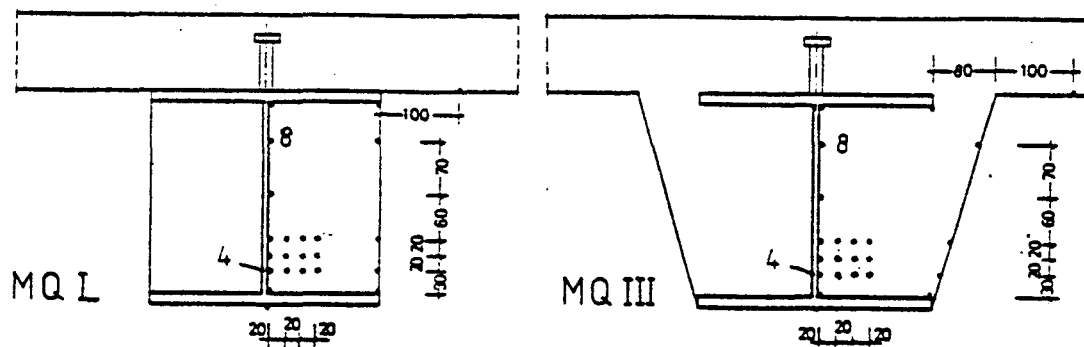
**Anlage 40: Temperaturentwicklung an der Betonoberfläche,
Versuchskörper M-300, Meßquerschnitt III**



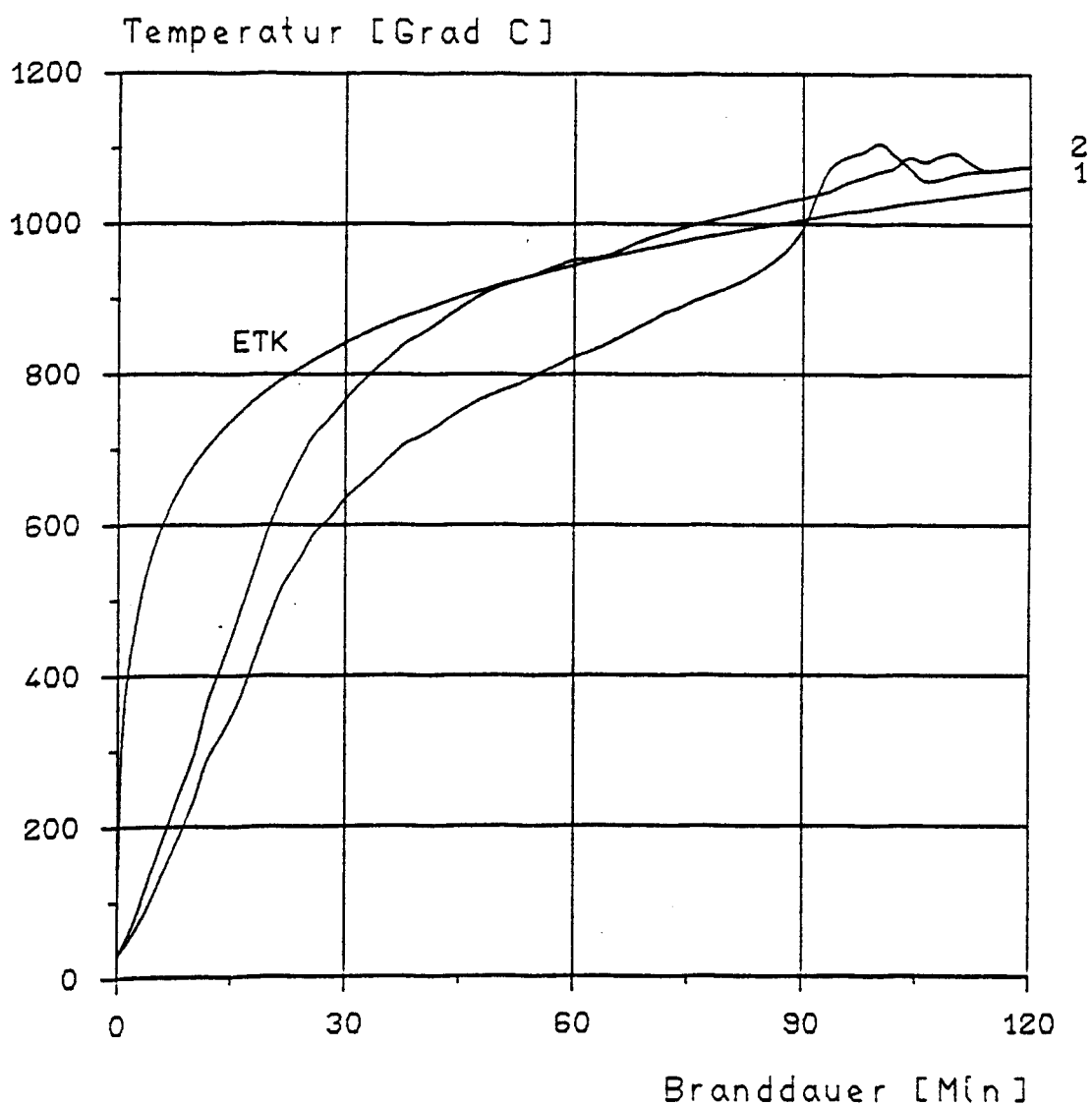
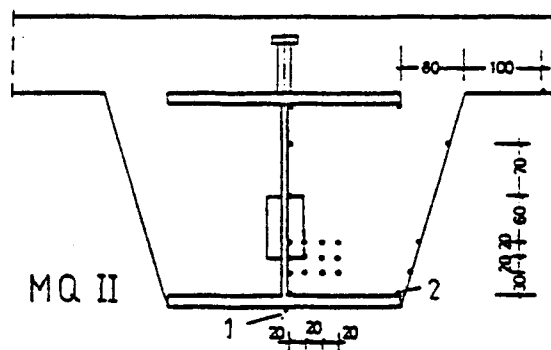
Anlage 41: Vergleich der Temperaturentwicklung oberflächennaher Meßstellen; Versuchskörper A-300



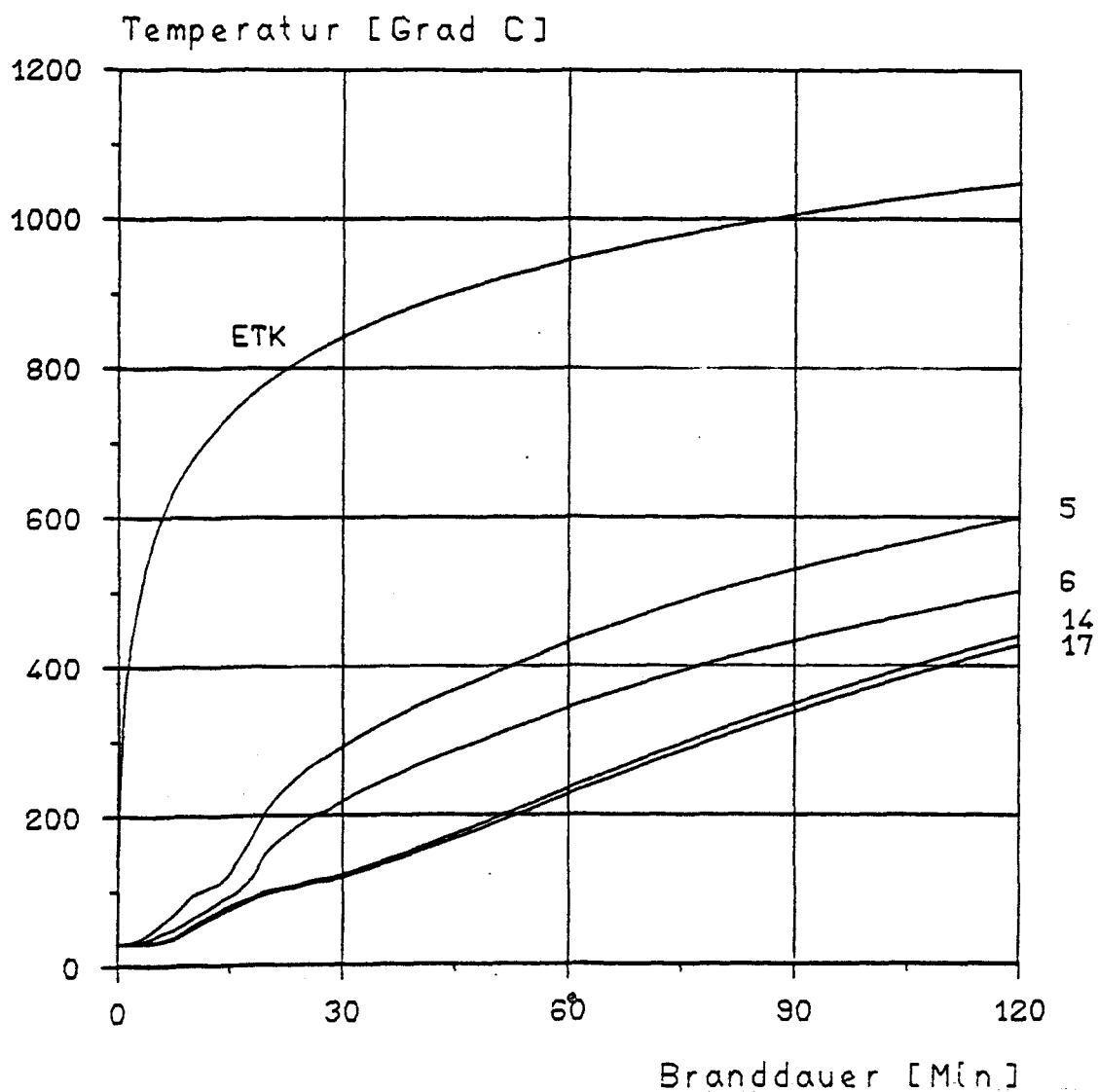
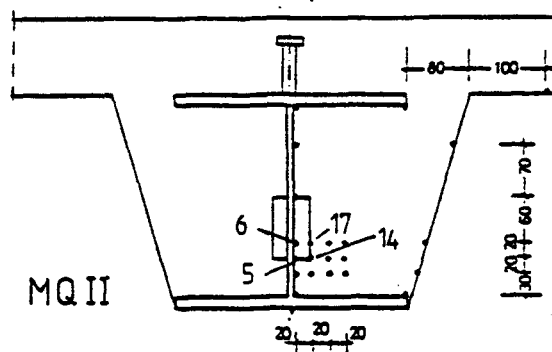
Anlage 42: Vergleich der Temperaturentwicklung von Meßstellen
am Obergurt des Stahlträgers; Versuchskörper A-300



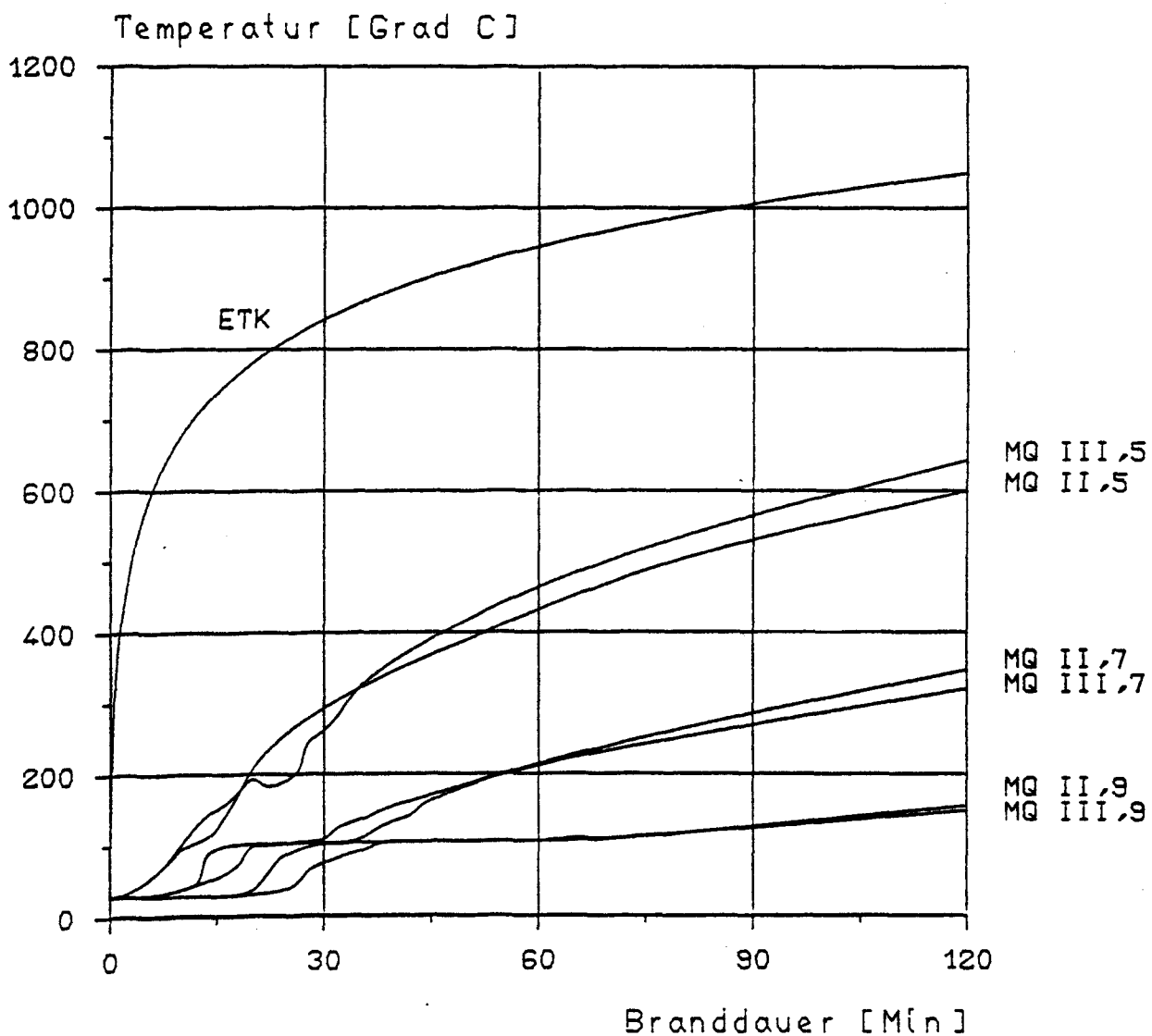
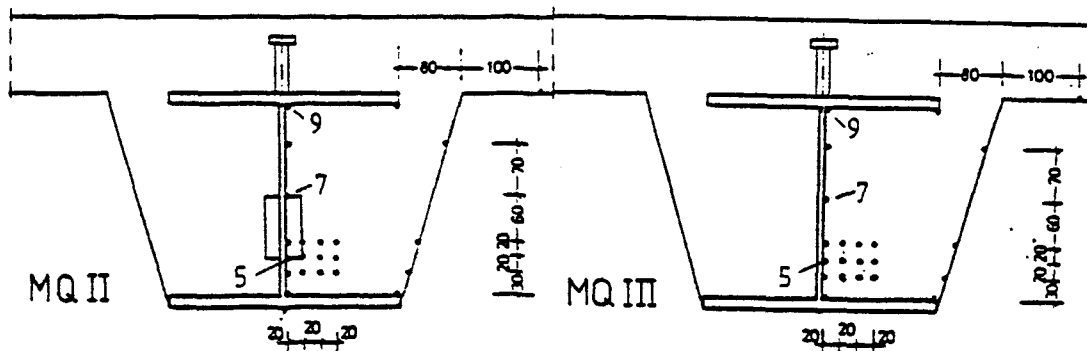
Anlage 43: Vergleich der Temperaturentwicklung von Meßstellen am Steg des Stahlträgers bei unterschiedlicher Betondeckung; Versuchskörper A-300



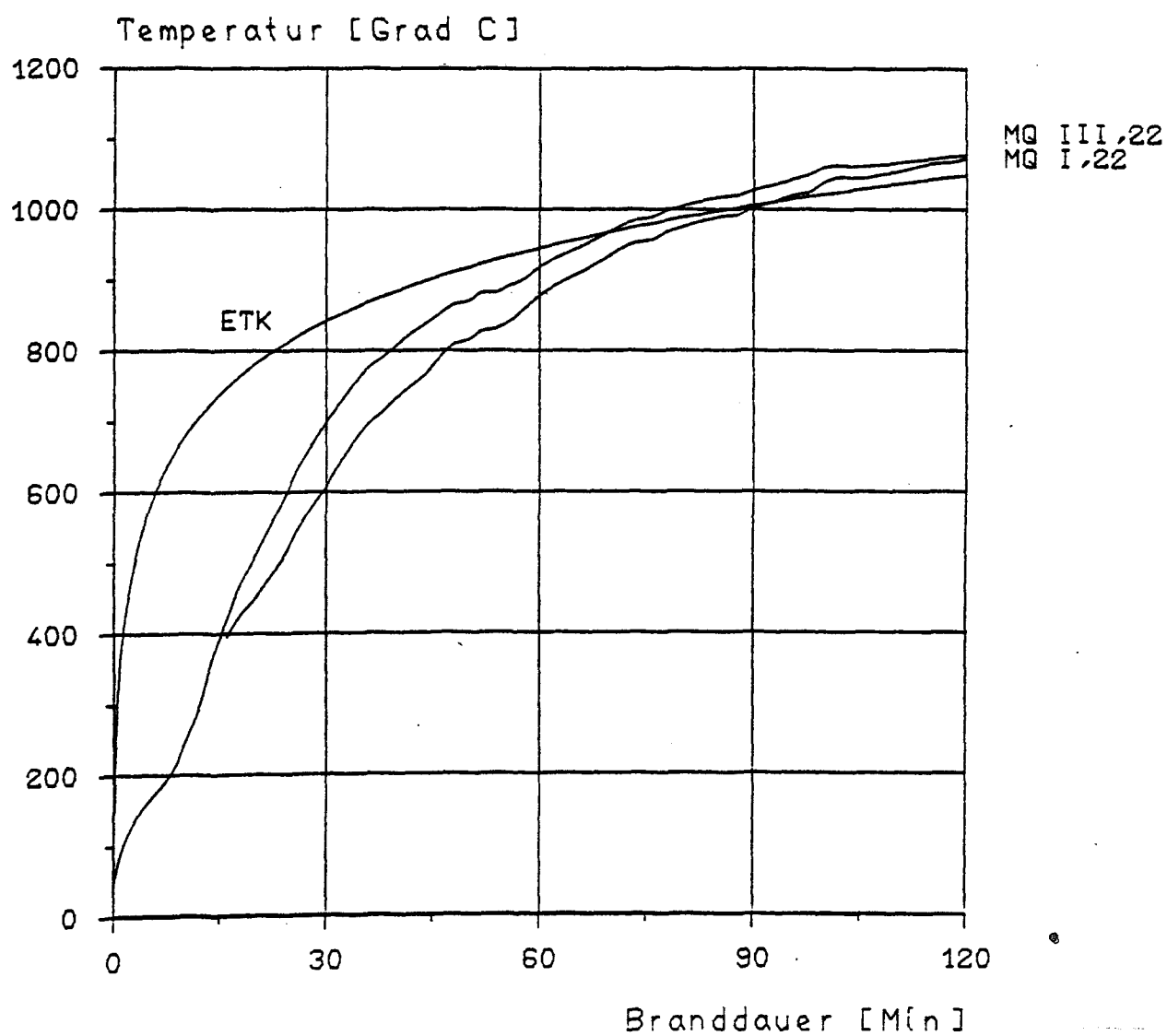
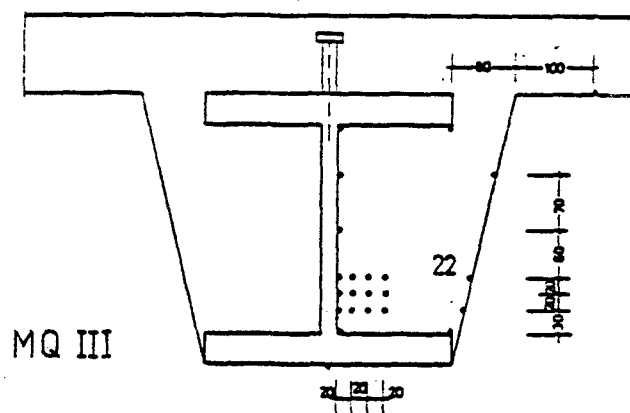
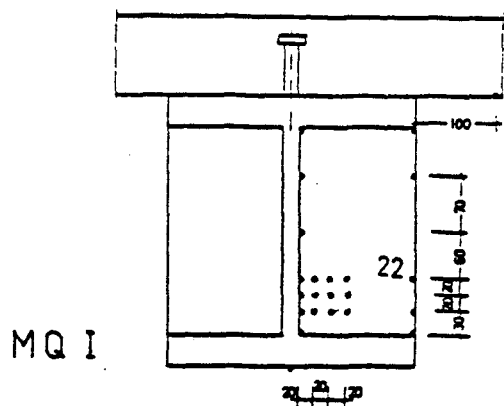
**Anlage 44: Vergleich der Temperaturentwicklung von Meßstellen
am Untergurt des Stahlträgers; Versuchskörper A-300**



Anlage 45: Vergleich der Temperaturentwicklung von Meßstellen
am Steg und an der Stegverstärkung des Stahlträgers;
Versuchskörper A-300

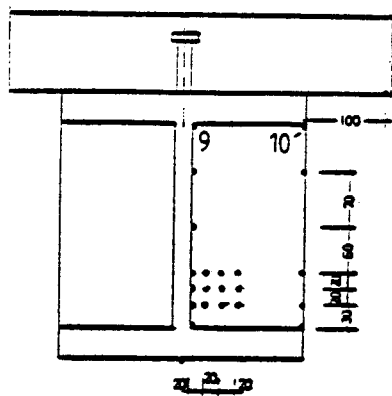


**Anlage 46: Vergleich der Temperaturentwicklung von Meßstellen
am Steg des Stahlträgers mit und ohne Stegverstärkung;
Versuchskörper A-300**

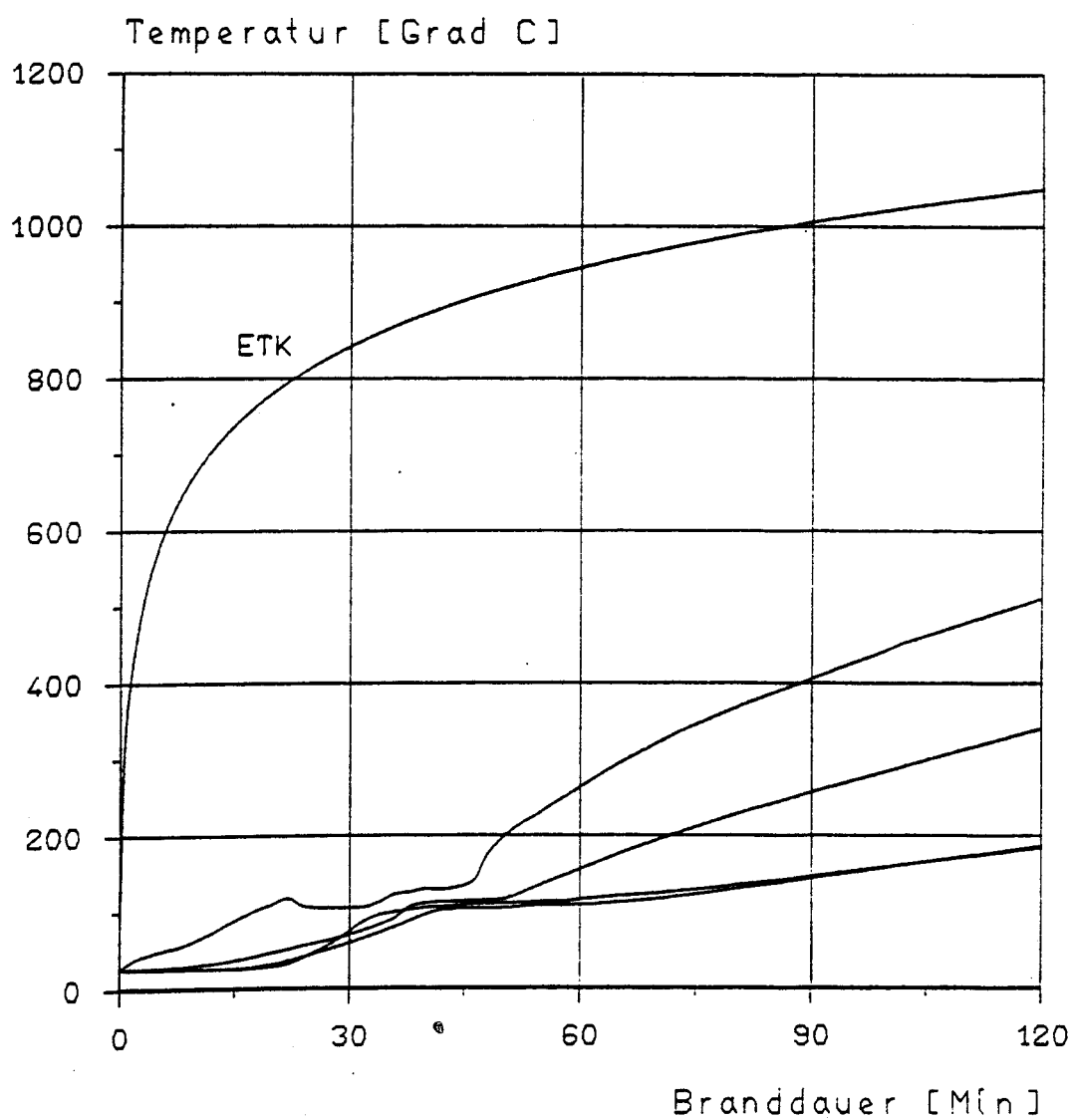
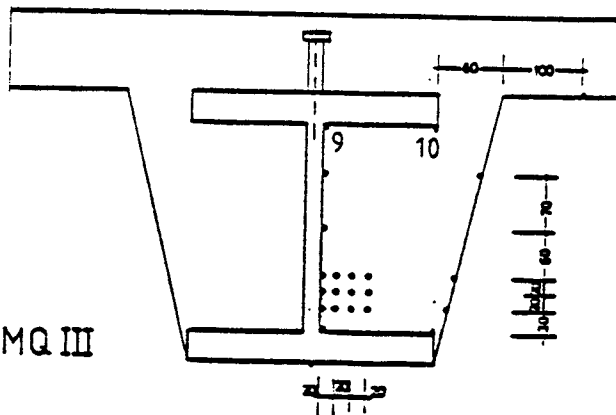


Anlage 47: Vergleich der Temperaturentwicklung oberflächennaher Meßstellen; Versuchskörper M-300

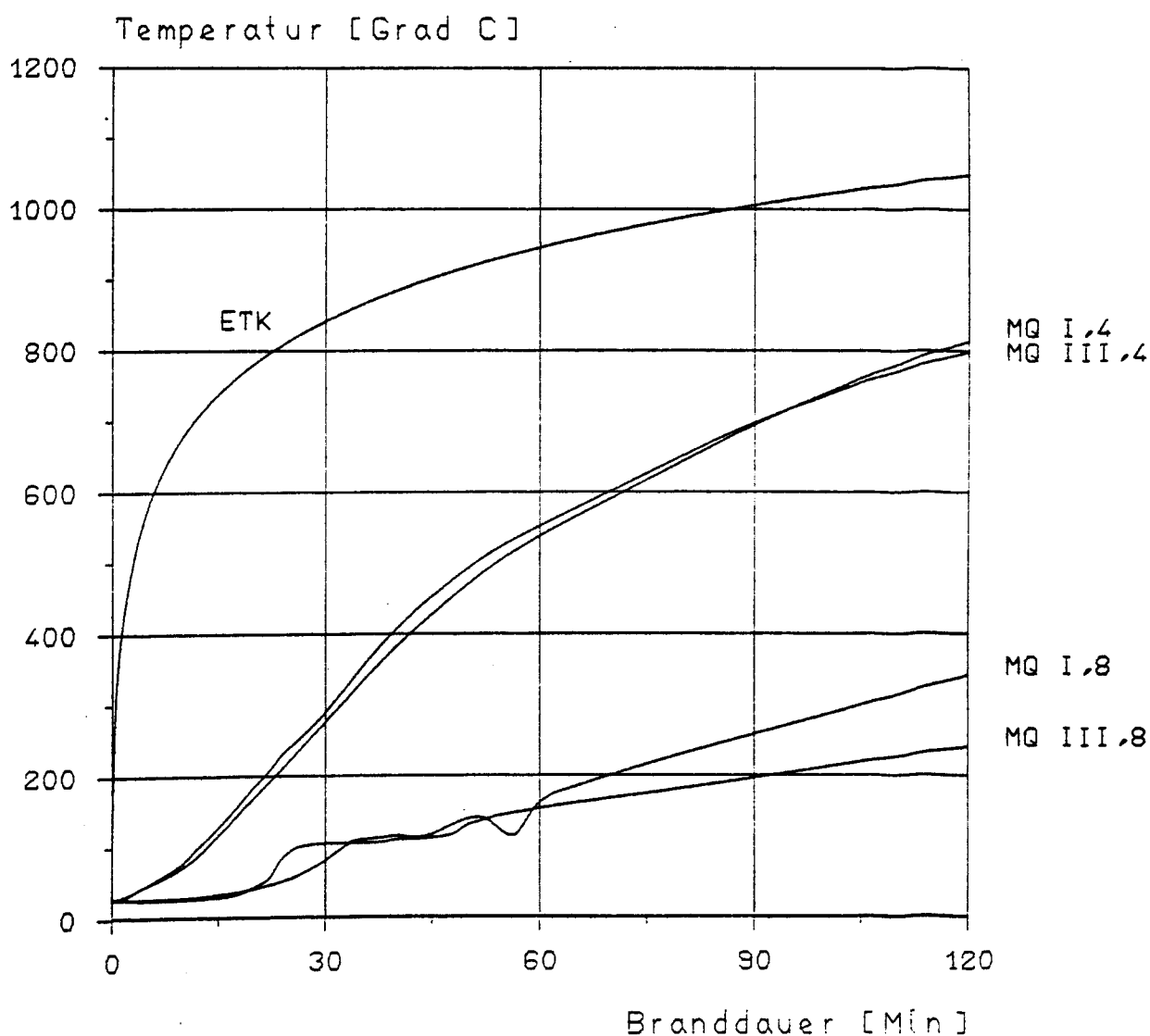
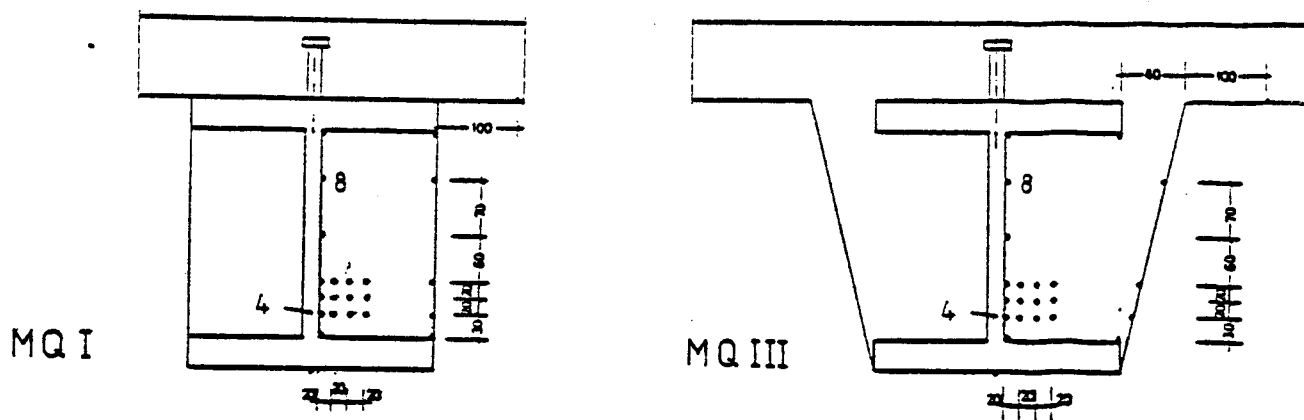
MQ I



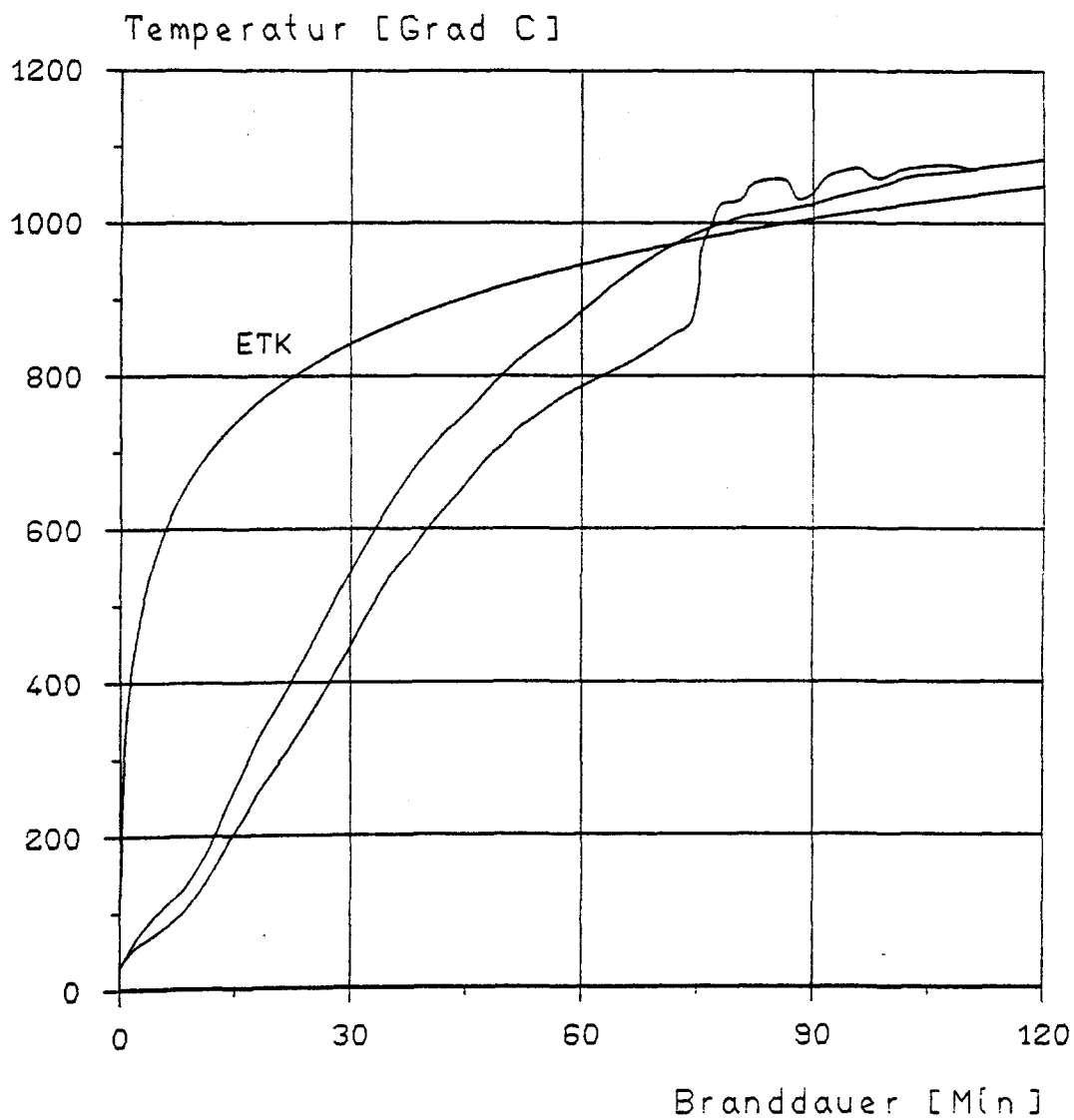
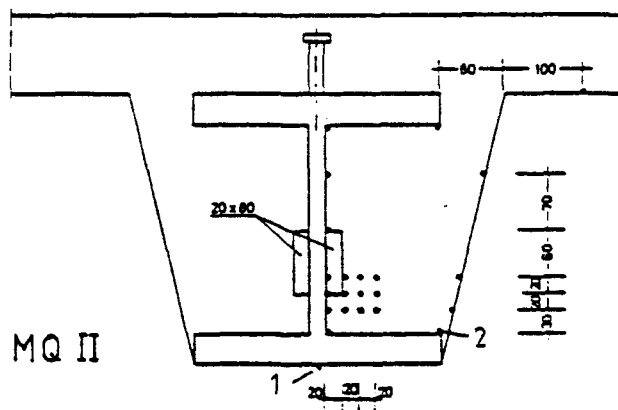
MQ III



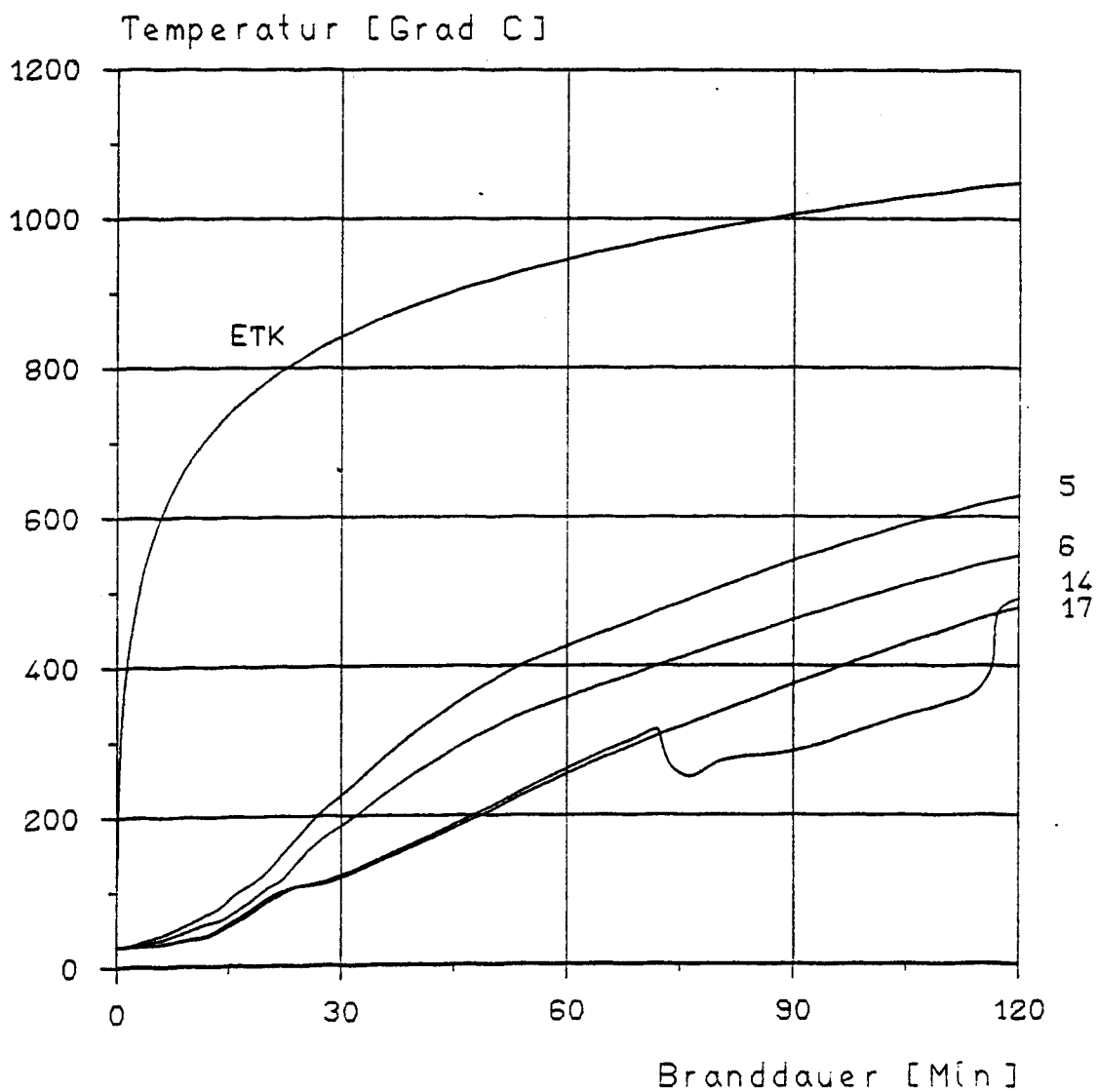
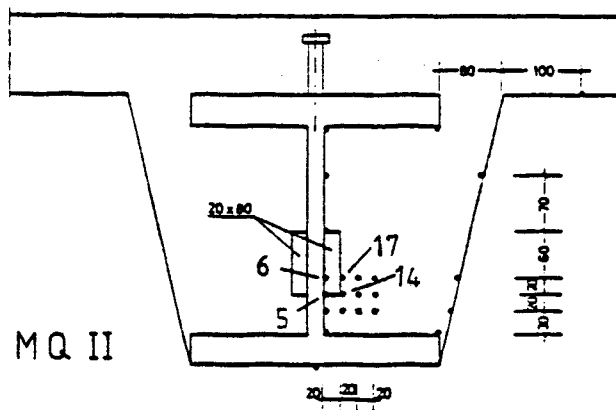
Anlage 48: Vergleich der Temperaturentwicklung von Meßstellen
am Obergurt des Stahlträgers; Versuchskörper M-300



Anlage 49: Vergleich der Temperaturentwicklung von Meßstellen am Steg des Stahlträgers bei unterschiedlicher Betondeckung; Versuchskörper M-300



**Anlage 50: Vergleich der Temperaturentwicklung von Meßstellen
am Untergurt des Stahlträgers; Versuchskörper M-300**



Anlage 51: Vergleich der Temperaturentwicklung von Meßstellen
am Steg und an der Stegverstärkung des Stahlträgers;
Versuchskörper M-300

